



Universidade de Aveiro
2015

Departamento de Física

Gisela Maria da Silva
Mello

**SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE POEIRAS
RADIOACTIVAS RESULTANTES DE UM ACIDENTE
NO COMPLEXO DE ANGRA DOS REIS, BRASIL.**

**DOCUMENTO
DEFINITIVO**

"Este estudo foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projecto Urban Atmospheric Quality, Climate Change and Resilience. EXCL/AAG-MAA/0383/2012"



Universidade de Aveiro Departamento de Física
2015

**Gisela Maria da Silva
Mello**

**SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE POEIRAS
RADIOACTIVAS RESULTANTES DE UM ACIDENTE
NO COMPLEXO DE ANGRA DOS REIS, BRASIL.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor José Manuel Henriques Castanheira Professor (Professor Auxiliar) e do Doutor Alfredo Moreira Caseiro Rocha Professor Associado c/ Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

José Fortes do Nascimento Lopes

Professor Auxiliar na Universidade de Aveiro

vogais

João Carlos Andrade dos Santos

Professor Auxiliar com Agregação na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (Arguente)

Alfredo Moreira Caseiro Rocha

Professor Associado com Agregação na Universidade de Aveiro (Orientador)

agradecimentos

Lá e cá outra vez.

Estes dois anos foram repletos de novas experiências e descobertas. Por exemplo, descobrir durante a preparação desta eussertação interestelar um novo significado para provisório e rápido.

Enfim, esta jornada não teria acontecido se não fosse pelo apoio, cada um do seu jeito, de pessoas muito queridas.

Aos meus pais pela ajuda e força passadas através das várias horas de conversas (e reclamações do Vasco) via skype. E por serem companheiros das andanças pela Europa.

Aos parentes em Viseu que tão bem me acolheram em sua casa.

À Avena companheira virtual de viagens e futura prefeita de Iguaba. Sempre te levei na minha mala, ainda bem que você é magrinha.

Aos megabogas parceiros de longa data, Xande e Melissa. Esse pensamento sempre funcionou com vocês: Amigos são como estrelas. Não precisamos vê-las para saber que estão lá. Mais um especial agradecimento ao Xande pelo resgate urgente nos momentos de fúria com o Matlab, sem você não conseguiria muitas das 412 imagens desta tese. PS: sua figurinha tosca está na página 48.

Aos Expandables do Open House da COEND, as mensagens alegraram meus dias. Elísio obrigada pelas contribuições ao texto.

À Hadad a quem voltei minhas orações.

Vida longa e próspera a todos.

Agradecimentos ao João Teixeira pelo [IDX C] = kmeans(PC,4), pelas simulações com o WRF e resolver o mistério de convertê-las. Aos orientadores pela paciência quando eu não mais a tinha.

Aos orientadores pela paciência quando não mais a tinha.

Às vezes ouço passar o vento; e só de ouvir o vento passar,
vale a pena ter nascido.

Fernando Pessoa

palavras-chave

Avaliação de Impactos Ambientais, Regimes de Tempo, k-Means, WRF, pluma de dispersão de poluentes atmosféricos.

resumo

O objetivo da avaliação de impactos ambientais (AIA) é permitir uma análise integrada de possíveis impactos diretos ou indiretos ao meio ambiente decorrentes da implantação e operação de empreendimentos, de forma a propor medidas ou programas que visem evitar, mitigar ou compensar tais impactos. Para tanto é necessário conhecer as diversas características das áreas direta e indiretamente afetadas pela instalação de um projeto, tais como as condições meteorológicas e climatológicas. Estas também são relevantes no estudo das emissões em cenários de operação regular ou acidental de empreendimentos, dada sua influência nas condições de transporte e de dispersão de poluentes na atmosfera. Neste trabalho é realizado um estudo das condições de dispersão de poluentes na atmosfera para a região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) em Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro, utilizando o modelo WRF, considerando um cenário acidental com liberações por 48 horas. Os dois episódios simulados representam os regimes de tempo predominantes na região obtidos a partir da análise pelo método k-means sobre as EOFs para o campo de pressões ao nível médio do mar entre os anos de 1985 e 2014. A aplicação da metodologia dos regimes de tempo permite observar os fenômenos meteorológicos de grande escala persistentes e recorrentes sobre uma dada região, servindo como uma ferramenta para a elaboração de estudos e documentos técnicos que fundamentem a decisão dos órgãos reguladores.

keywords

Environmental Impact Assessment, Weather Regimes, K-means, air pollutants dispersion plume.

abstract

The purpose of Environmental Impact Assessment (EIA) is to make an integrated evaluation of possible direct or indirect impacts to the environment resulting from the implementation or operation of projects, in order to propose measures or programs to prevent, mitigate or compensate such impacts. Therefore, it is necessary to understand several characteristics of the affected direct or indirect areas by the project's installation, such as weather and climatic conditions. These qualities are relevant in the study of regular operation or accidental emissions scenarios, due their influence on pollutant transportation and dispersion in the atmosphere. In this work, it is made an study of the pollutant dispersion conditions in the atmosphere to the Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) area, in Angra dos Reis, State of Rio de Janeiro, using the WRF model and considering an accidental scenario of 48 hours of releases. The two simulated episodes represent the prevailing weather regimes of the region, they were obtained through the k-means method analysis upon mean sea level pressure EOFs between 1985 and 2014. The use of weather regimes methodology allows to verify persistent and recurrent synoptic weather phenomenas over a region and it is a tool to prepare studies and technical documents to support the regulatory agencies decision.

Sumário

Lista de Figuras	2
Lista de Tabelas.....	6
Capítulo 1 – Introdução.....	7
1. Histórico da questão ambiental e Avaliação de impactos ambientais.....	7
2. Licenciamento ambiental Portugal e Brasil	10
3. Componente meteorologia e climatológica no licenciamento ambiental.....	12
Capítulo 2 – Centrais Nucleares.....	15
1. Descrição do processo de geração de energia nuclear	15
2. Centrais nucleares no mundo	17
3. Centrais nucleares no Brasil.....	18
4. Considerações sobre a energia nuclear.....	19
5. Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAB) – Descrição	24
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica	27
1. Regimes de tempo	29
2. Análise por clusters	32
3. Determinação de regimes de tempo através do algoritmo k-means	33
4. Funções Empíricas Ortogonais (EOFs).....	34
5. Dispersão de poluentes atmosféricos	35
Capítulo 4 – Metodologia.....	41
Capítulo 5 - Resultados e Discussão	49
1. Regimes de Tempo- América do Sul	50
2. Regimes de Tempo- Região Sudeste.....	55
3. Estudo da dispersão de poluentes para os regimes de tempo	60
Episódio 1 – Regime de tempo 1 – 06 a 11 de janeiro de 2014	74
Episódio 2 – Regime de tempo 3 – 22 a 31 de julho de 2013	81
4. Estudo das trajetórias para os episódios 1 e 2	93
Avaliação da trajetória da pluma para o episódio 1.....	95
Avaliação da trajetória da pluma para o episódio 2.....	114
Capítulo 6 – Conclusão	142
Bibliografia	144

Lista de Figuras

Figura 1 - Plantas nucleares em operação no mundo até o anos de 2011.	17
Figura 2 - Mapa de deposição no solo do cézio-137 liberado no acidente em Chernobyl	20
Figura 3 - Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), Angra dos Reis/RJ.....	24
Figura 4 - Perfil topográfico da região da CNAAA.....	25
Figura 5 - Representação esquemática do processo de análise por clusters.....	42
Figura 6 - Mapa dos domínios utilizados na simulação com o WRF.....	47
Figura 7 - Continente Sul-americano – Regime de tempo 1.....	50
Figura 8 - Continente Sul-americano – Regime de tempo 2.....	50
Figura 9 - Continente Sul-americano – Regime de tempo 3.....	50
Figura 10 - Continente Sul-americano – Regime de tempo 4	50
Figura 11 - Continente Sul-americano - Regime de tempo 5	50
Figura 12 - Localização da CNAAA.....	54
Figura 13 - Regime de tempo 1 - Região sudeste do Brasil	55
Figura 14 - Regime de tempo 2 - Região sudeste do Brasil	55
Figura 15 - Regime de tempo 3 - Região sudeste do Brasil	55
Figura 16 - Regime de tempo 4 - Região sudeste do Brasil	56
Figura 17 - Regime de tempo 5 - Região sudeste do Brasil	56
Figura 18 - Variações espaciais da ocorrência de frentes frias e quentes na América do Sul.....	58
Figura 19 - Rosa dos ventos - CNAAA – Regime de Tempo 1	63
Figura 20 - Rosa dos ventos - CNAAA – Regime de Tempo 2	63
Figura 21 - Rosa dos ventos -CNAAA – Regime de Tempo 3	63
Figura 22 - Rosa dos ventos -CNAAA – Regime de Tempo 4	63
Figura 23 - Rosa dos ventos - CNAAA – Regime de Tempo 5	64
Figura 24 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 1	64
Figura 25 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 2	64
Figura 26 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 3	65
Figura 27 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 4	65
Figura 28 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 5	65
Figura 29 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 1 no ano de 2013	70
Figura 30 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 2 no ano de 2013	70
Figura 31 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 3 no ano de 2013	70
Figura 32 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 4 no ano de 2013	70
Figura 33 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 5 no ano de 2013	70
Figura 34 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 1 no ano de 2014.....	70
Figura 35 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 2 no ano de 2014.....	70
Figura 36 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 3 no ano de 2014.....	70

Figura 37 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 4 no ano de 2014.....	71
Figura 38 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 5 no ano de 2014.....	71
Figura 39 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 1 em 2013.....	71
Figura 40 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 2 em 2013.....	71
Figura 41 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 3 em 2013.....	71
Figura 42 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 4 em 2013.....	71
Figura 43 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 5 em 2013.....	71
Figura 44 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 1 em 2014.....	72
Figura 45 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 2 em 2014.....	72
Figura 46 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 3 em 2014.....	72
Figura 47 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 4 em 2014.....	72
Figura 48 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos (m s^{-1}) para o Regime de Tempo 5 em 2014.....	72
Figura 49 - perfil temporal dos ventos(ms^{-1}) para o Rio de Janeiro de 6 a 09 de Janeiro de 2014 às 00:00Z, 06:00Z, 12:00Z e 18:00Z.....	74
Figura 50 – perfil temporal dos ventos (m s^{-1}) para CNAAA de 6 a 09 de Janeiro de 2014 às 00:00Z, 06:00Z, 12:00Z e 18:00Z.....	75
Figura 51 - Campo de PNMM (hPa) em 05/01/2014.....	75
Figura 52 - Campo de PNMM (hPa) em 06/01/2014.....	75
Figura 53 - Campo de PNMM (hPa) para 07/01/2014.....	76
Figura 54 - Campo de PNMM (hPa) para 08/01/2014.....	76
Figura 55 - Campo de PNMM (hPa) para 09/01/2014.....	76
Figura 56- Campo de PNMM (hPa) para 10/01/2014.....	76
Figura 57– Linhas de corrente para o campo de ventos em 05/01/2014.....	76
Figura 58 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 06/01/2014.....	76
Figura 59 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 07/01/2014.....	76
Figura 60 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 08/01/2014.....	76
Figura 61 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 09/01/2014.....	77
Figura 62– Linhas de corrente para o campo de ventos em 10/01/2014.....	77
Figura 63 – Campo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para 05/01/2014	77
Figura 64 – Campo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)para 06/01/2014	77
Figura 65 – Campo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para 07/01/2014	77
Figura 66 – Campo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para 08/01/2014	77
Figura 67 – Campo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para 09/01/2014	78
Figura 68 – Campo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para 10/01/2014	78

Figura 69 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 05/01/2014 12Z	78
Figura 70 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 06/01/2014 12Z	78
Figura 71 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 07/01/2014 12Z	79
Figura 72 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 08/01/2014 12Z	79
Figura 73 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 09/01/2014 12Z	79
Figura 74 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 10/01/2014 12Z	79
Figura 75 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 05/01/2014 12Z	80
Figura 76 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 06/01/2014 12Z	80
Figura 77 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 07/01/2014 12Z	80
Figura 78 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 08/01/2014 12Z	80
Figura 79 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 09/01/2014 12Z	81
Figura 80 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 10/01/2014 12Z	81
Figura 81 – Distribuição do vento (m s^{-1}) para a CNAAA, entre os dias 22 e 27 de julho de 2013, 4 vezes por dia.....	83
Figura 82 - Distribuição do vento (m s^{-1}) para o Rio de Janeiro, entre os dias 22 e 27 de julho de 2013, 4 vezes por dia.....	83
Figura 83 - Campo de PNMM (hPa) em 22/07/2013.....	84
Figura 84 - Campo de PNMM (hPa) em 23/07/2013.....	84
Figura 85 - Campo de PNMM (hPa) em 24/07/2013.....	84
Figura 86- Campo de PNMM (hPa) em 25/07/2013.....	84
Figura 87 - Campo de PNMM (hPa) em 26/07/2013.....	84
Figura 88 - Campo de PNMM (hPa) em 27/07/2013.....	84
Figura 89 - Campo de (hPa) PNMM em 28/07/2013.....	84
Figura 90 - Campo de PNMM (hPa) em 29/07/2013.....	84
Figura 91 - Campo de PNMM (hPa) em 30/07/2013.....	85
Figura 92 - Campo de PNMM (hPa) em 31/07/2013.....	85
Figura 93 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 22/07/2013.....	85
Figura 94 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 23/07/2013.....	85
Figura 95 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 24/07/2013.....	85
Figura 96 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 25/07/2013.....	85
Figura 97 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 26/07/2013.....	85
Figura 98 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 27/07/2013.....	85
Figura 99 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 28/07/2013.....	86
Figura 100 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 29/07/2013.....	86

Figura 101 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 30/07/2013	86
Figura 102 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 31/07/2013	86
Figura 103 – Campo de temperatura (°C) para 22/07/2013	86
Figura 104 – Campo de temperatura (°C) para 23/07/2013	86
Figura 105 – Campo de temperatura (°C) para 24/07/2013	87
Figura 106 – Campo de temperatura (°C) para 25/07/2013	87
Figura 107 – Campo de temperatura (°C) para 26/07/2013	87
Figura 108 – Campo de temperatura (°C) para 27/07/2013	87
Figura 109 – Campo de temperatura (°C) para 28/07/2013	87
Figura 110 – Campo de temperatura (°C) para 29/07/2013	87
Figura 111 – Campo de temperatura (°C) para 30/07/2013	88
Figura 112 – Campo de temperatura(°C) para 31/07/2013	88
Figura 113– Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 20/07/2013 12Z	88
Figura 114– Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 21/07/2013 12Z	88
Figura 115– Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 21/07/2013 12Z	89
Figura 116 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 21/07/2013 12Z	89
Figura 117 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 21/07/2013 12Z	89
Figura 118 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 27/07/2013 12Z	89
Figura 119 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 28/07/2013 12Z	90
Figura 120 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 29/07/2013 12Z	90
Figura 121 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 30/07/2013 12Z	90
Figura 122 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 31/07/2013 12Z	90
Figura 123 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 22/07/2013 12Z	91
Figura 124 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 23/07/2013 12Z	91
Figura 125 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 24/07/2013 12Z	91
Figura 126 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 25/07/2013 12Z	91
Figura 127 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 26/07/2013 12Z	92
Figura 128 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 27/07/2013 12Z	92
Figura 129– Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 28/07/2013 12Z	92

Figura 130 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 29/07/2013 12Z	92
Figura 131 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 30/07/2013 12Z	93
Figura 132 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 31/07/2013 12Z	93
Figura 133 – Evolução temporal da pluma de dispersão com as concentrações integradas para os 8 primeiros níveis eta com intervalo de 3 horas	101
Figura 134 – Evolução temporal da pluma de dispersão com as concentrações integradas para os níveis eta 9 a 39 com intervalo de 3 horas	106
Figura 135 - Variação longitudinal média das concentrações com intervalo de 3 horas	110
Figura 136 - Variação latitudinal média das concentrações com intervalo de 3 horas.	114
Figura 137 – Evolução temporal da pluma de dispersão com as concentrações integradas para os 8 primeiros níveis eta com intervalo de 3 horas.	122
Figura 138 - – Evolução temporal da pluma de dispersão com as concentrações integradas para os níveis eta 9 a 39 com intervalo de 3 horas.	129
Figura 139 - Variação latitudinal média das concentrações com intervalo de 3 horas.	135
Figura 140 - Variação longitudinal média das concentrações com intervalo de 3 horas	140

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Total de dias por regime de tempo entre 1985 e 2014.	44
Tabela 2 – Total de episódios selecionados por regimes de tempo para os anos de 2013 e 2014....	44
Tabela 3 - Distribuição das velocidades dos ventos por regime de tempo (%) para a CNAAA entre 1985 e 2014.	61
Tabela 4 - Distribuição das velocidades dos ventos por regime de tempo (%) para o Rio de Janeiro entre 1985 e 2014.	62
Tabela 5 - Velocidade média dos ventos por regime de tempo ($m s^{-1}$) entre 1985 e 2014.....	62
Tabela 6 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo entre 1985 e 2014 – CNAAA.....	66
Tabela 7 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo entre 1985 e 2014 – Rio de Janeiro.....	66
Tabela 8 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – CNAAA – 2013.....	67
Tabela 9 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – CNAAA – 2014.....	67
Tabela 10 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – Rio de Janeiro – 2013.....	68
Tabela 11 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – Rio de Janeiro – 2014.....	68

Capítulo 1 – Introdução

Histórico da questão ambiental e Avaliação de impactos ambientais

Registros da relação entre as intervenções humanas e os problemas ambientais decorrentes não são recentes. No século XIV em Londres, por exemplo, a redução da qualidade do ar devido à queima de carvão tornou-se um problema tão grave que o Rei Edward I emitiu uma lei banindo sua queima durante as sessões do Parlamento (Freese, 2003 e Gaffney, 2009). A percepção destes problemas ambientais evoluiu ao longo do tempo, conforme crescia a consciência sobre os impactos oriundos, principalmente, do aumento da concentração de indústrias (com a geração significativa de resíduos sem disposição final ou tratamento adequados), além do uso sem limites dos recursos naturais em um cenário onde o desenvolvimento estava associado à industrialização e ao crescimento econômico (UNICAMP, n.d.).

O século XX foi marcado por movimentos ambientais e pela elaboração de dispositivos legais derivados da preocupação com os problemas ambientais. Assim, a exigência de processo de tomada de decisão através do licenciamento ambiental e da avaliação de impactos ambientais necessários para a instalação ou inserção de empreendimentos potencialmente poluidores derivou da preocupação com a preservação dos recursos naturais e manutenção da qualidade ambiental a partir da década de 50.

O panorama da década de 60 foi marcado pelo crescimento econômico do pós-guerra e pela crise ambiental resultante dos problemas gerados pelos grandes projetos de desenvolvimento. Uma vez que a avaliação dos mesmos limitava-se aos estudos de viabilidade técnica e análise de custos-benefício, já que os problemas ambientais eram encarados como o resultado do processo e dos critérios de avaliação usados na tomada de decisão. Em 1968, profissionais de dez países discutiram assuntos relacionados ao uso indiscriminado dos recursos naturais mundiais no chamado Clube de Roma, que gerou um relatório: “Os Limites do Crescimento” (1972). Outros movimentos de grupos ecologistas também surgiram neste período e visavam defender a melhoria dos processos e dos critérios de tomada de decisão sobre grandes projetos. Levando a criação do instrumento de política de ambiente conhecido como Avaliação de Impacto Ambiental (APA, n.d.).

No final dos anos 60, os Estados Unidos foram o primeiro país a institucionalizar a fiscalização dos impactos ambientais através da aprovação do Ato da Política Nacional para o Meio Ambiente (The National Environmental Policy Act – NEPA) adotando o sistema de Avaliação de Impactos Ambientais (AIA), impondo a obrigatoriedade de avaliação prévia dos impactos ambientais, antes da tomada de decisão (Egler, 2010).

O crescimento industrial e econômico continuou durante a década de 70, ao mesmo tempo que as manifestações internacionais de grande porte tornam-se mais frequentes, ocupando maior espaço na mídia (Pivello, 2007). Tais movimentos buscavam estratégias no âmbito político-econômico que permitissem compatibilizar o uso dos recursos com a qualidade de vida da população. Como mencionado anteriormente, os impactos ambientais tornam-se ainda mais evidentes, refletindo um conflito crescente entre a expansão do modelo de crescimento econômico e os efeitos degradadores sobre os ecossistemas naturais. Citam-se como problemas sócio-ambientais: a urbanização acelerada, o crescimento e a desigual distribuição demográfica, o consumo excessivo e contaminação tóxica de recursos não-renováveis, os fenômenos crescentes desertificação, o desmatamento, além da redução da biodiversidade e da diversidade cultural (da Costa Lima, 1985).

Em 1972, em Estocolmo, ocorreu a Assembléia Geral das Nações Unidas para o Meio Ambiente, com a participação de 113 países, sendo o primeiro grande encontro global de líderes governamentais. Onde foram discutidas: questões levantadas pelo Clube de Roma, a necessidade de criação de novos instrumentos para tratar de problemas ambientais e as bases para um novo entendimento a respeito das relações entre o ambiente e o desenvolvimento. Apesar dos conflitos, a Conferência foi um marco ao abrir espaço para outras conferências internacionais, além de ajudar na elaboração dispositivos legais e na criação de diversas agências internacionais, órgãos ambientais e organizações não-governamentais, como o *Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA/UNEP)* - que coordena as ações no âmbito ambiental da ONU. Os objetivos e diretrizes da Assembléia foram ratificados na Conferência Intergovernamental sobre Educação Ambiental realizada em Tbilisi, Geórgia, em 1977, sendo enunciadas 41 recomendações sobre educação ambiental (Secretaria do Meio Ambiente – Coordenadoria de Educação Ambiental, 1993).

Nos anos 80, além da escassez dos recursos naturais, as discussões passaram a envolver a capacidade de suporte dos ecossistemas em relação aos resíduos gerados a partir das atividades humanas. Neste período houve a criação da Comissão mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (1983) e a publicação do relatório “Nosso Futuro Comum” ou Relatório “Brundtland”(1987) que parte da possibilidade e da necessidade de conciliar crescimento econômico com a conservação ambiental, fundamentando o conceito de desenvolvimento sustentável e um conjunto de premissas que desde então tem orientado os debates sobre desenvolvimento e questão ambiental.

Em 1992 no Rio de Janeiro ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), também chamada de Cúpula da Terra ou RIO92, organizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) com a participação dos 179 países onde foram elaborados documentos, como: a Carta da Terra (Declaração do Rio de Janeiro sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento), a Convenção sobre Diversidade Biológica, a Convenção Marco sobre Mudanças Climáticas, a Declaração sobre Florestas e a Agenda 21. Esta última é um instrumento de planejamento para a construção de sociedades sustentáveis, em diferentes bases geográficas, que concilia métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica, ou seja, que busca promover, em escala planetária, um novo padrão de desenvolvimento, o “desenvolvimento sustentável” (MMA, n.d. a).

A Convenção sobre a Diversidade Biológica de 1992 foi o primeiro acordo internacional que teve por objetivo proteger todos os aspectos de diversidade biológica abordando em seu Artigo 14 a avaliação e minimização dos impactos adversos. A avaliação de Impacto Ambientais está inserida na declaração do Rio sobre Ambiente e Desenvolvimento nos princípios 17 e 19 (MMA, n.d. b).

Em 1997 entra em vigor a Convenção Espoo (Convenção sobre a Avaliação dos Impactos Ambientais num Contexto Transfronteiriço) que regula a AIA num contexto transfronteiriço influenciando na revisão da Directiva da AIA de 1985. Além dela, em Kyoto no Japão é assinado o Protocolo de Kyoto, em que os países industrializados se comprometem a reduzir no período de 2008 a 2012 as emissões de poluentes em 5,2% em relação aos índices de emissões de 1990.

A Cúpula Mundial de Desenvolvimento Sustentável, conhecida como Rio+10, realizada em 2002 em Johannesburgo teve por objetivo avaliar o progresso das metas traçadas na Cúpula da Terra de 1992, especialmente quanto à Agenda 21, analisando os resultados e propondo alterações para que os objetivos ambientais fossem alcançados.

Licenciamento ambiental Portugal e Brasil

Com a realização das grandes conferências a nível mundial e diversos documentos e acordos gerados, muitos países produziram sua legislação e normas técnicas para nortear os diferentes aspectos associados ao meio ambiente.

Seguindo os caminhos abertos pelo NEPA, muitos países desenvolvidos, e também os em desenvolvimento, adotaram o processo de AIA como o procedimento para incorporar as questões ambientais (e sociais) nas atividades de planejamento e de tomada de decisão. A existência hoje, em qualquer país, de um processo de estudo de impactos ambientais é um critério utilizado para demonstrar que o ambiente (físico e social) está sendo considerado na implementação de empreendimentos, independentemente se esse processo está sendo apenas usado como um procedimento formal de legitimação, ou como um instrumento efetivo de negociação e mediação (Egler, 2010).

A Associação International para Avaliação de Impactos (IAIA), define no documento “Princípios da Melhor Prática em Avaliação de Impacte Ambiental” a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) como: “(...) o processo de identificação, previsão, avaliação e mitigação dos efeitos biofísicos, sociais e outros efeitos relevantes de propostas de desenvolvimento antes de decisões fundamentais serem tomadas e de compromissos serem assumidos” (APAI, n.d.). Ao mesmo tempo, a Agência Portuguesa do Ambiente descreve a Avaliação de Impacte Ambiental como sendo “um instrumento de carácter preventivo da política do ambiente, sustentado na realização de estudos e consultas, com efetiva participação pública e análise de possíveis alternativas, que tem por objeto a recolha de informação, identificação e previsão dos efeitos ambientais de determinados projetos, bem como a identificação e proposta de medidas que evitem, minimizem ou compensem esses efeitos, tendo em vista uma decisão sobre a viabilidade da execução de tais projetos e respetiva pós-avaliação.” (APAAMBIENTE, n.d.).

No que tange a avaliação de impactos ambientais, a primeira lei específica para adoção da AIA na legislação portuguesa, ocorreu em 1990, sendo entretanto revogada. A exigência da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), tal como decorre do preâmbulo do Decreto Lei nº69/2000, de 3 de Maio, teve sua redação dada pelo Decreto-Lei nº 197/2005 de 8 de Novembro, o qual estabelece o regime jurídico da avaliação do impacto ambiental dos projectos públicos e privados susceptíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente, transpondo para a ordem jurídica interna a Directiva nº 85/337/CEE, com as alterações introduzidas pela Directiva nº97/11/CE (APAI, n.d.). No atual regime jurídico, a Avaliação de Impactos Ambientais encontra-se fundamentada pelo Decreto-Lei nº 151-B/2013, que transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva nº 2011/92/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, representando os compromissos assumidos pelo Governo Português no quadro da Convenção sobre Avaliação dos Impactos Ambientais num Contexto Transfronteiriço (Convenção de Espoo), aprovada pelo Decreto n.º 59/99 (APAAMBIENTE, n.d.).

A legislação ambiental vigente no Brasil impõem a obrigatoriedade da obtenção de licença ambiental para a instalação de qualquer empreendimento ou atividade potencialmente poluidora ou degradadora do meio ambiente. A Licença Ambiental é definida pela legislação como sendo um ato administrativo pelo qual o órgão ambiental competente, estabelece as condições, restrições e medidas de controle ambiental que deverão ser obedecidas pelo empreendedor, pessoa física ou jurídica, para localizar, instalar, ampliar e operar empreendimentos ou atividades utilizadoras dos recursos ambientais consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou aquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental.

Para a obtenção da referida licença, deve ocorrer um procedimento administrativo chamado de licenciamento ambiental no qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental.

As principais diretrizes para a execução do licenciamento ambiental estão expressas na Lei 6.938/81 e nas Resoluções CONAMA nº 001/86 e nº 237/97. Enquanto a Lei Complementar nº 140/2011 trata da competência dos estados brasileiros e da federação

para o licenciamento, tendo como fundamento a localização do empreendimento. Recentemente foi publicado o Decreto nº 8.437, que regulamenta o disposto no art. 7º da Lei Complementar nº 140 estabelecendo as tipologias de empreendimentos e atividades cujo licenciamento ambiental será de competência da União.

Ressalta-se que a Lei 6.938/81 estabeleceu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), criando o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis (IBAMA) – órgão executor e fiscalizador. Essa Política inicia no Brasil o planejamento ambiental integrado, como forma de orientação ao ordenamento territorial. Antes dela, as poucas diretrizes ambientais que existiam eram setorizadas e desvinculadas umas das outras (Pivello, 2007).

O rito do processo de licenciamento, no geral, ocorre em três etapas distintas: prévia, de instalação e de operação, que ultrapassadas fornecem uma licença distinta para cada etapa. Na fase de licenciamento prévio é verificada a viabilidade ambiental, localização e concepção tecnológica do projeto proposto por meio de estudo de impacto ambiental (EIA), ou outro estudo simplificado conforme o tipo de empreendimento. Na etapa de Instalação o empreendedor deve apresentar para avaliação e aprovação o detalhamento dos programas ambientais de mitigação ou compensação dos impactos derivados da implantação do empreendimento. Antes da entrada em operação deverá ser solicitada a emissão da Licença de Operação (LO) do empreendimento que autoriza o início do funcionamento da obra/empreendimento.

Componente meteorologia e climatológica no licenciamento ambiental

Para cada etapa do licenciamento são exigidos estudos ou informações técnicas a fim de subsidiar análises e tomadas de decisão por parte do órgão regulador, dentre os quais pode-se destacar o Estudo de Impacto Ambiental (EIA). Este documento técnico-científico multidisciplinar permite caracterizar a área de inserção do empreendimento e a área de influência direta e indireta dos possíveis impactos por meio de um diagnóstico ambiental, detalhamento de impactos e respectivas medidas e controle e de monitoramento. Nesse contexto, dados sobre fauna, flora, socioeconomia, hidrografia, espeleologia, geologia,

geomorfologia, geotecnia, qualidade do ar, meteorologia e climatologia são essenciais. Considerando os aspectos atmosféricos, torna-se necessário um conhecimento dos sistemas meteorológicos atuantes nas diferentes escalas, além da caracterização climatológica com base em parâmetros como: precipitação (regime pluviométrico), temperatura do ar e ventos (direção e velocidade).

Apesar da relevância de tais informações, verificam-se por vezes nos estudos ambientais que as mesmas são apresentadas de forma incompleta, em caráter demonstrativo ou como atendimento às exigências do órgão regulador. Ou ainda abordando aspectos irrelevantes ao que se propõem o estudo ambiental. Isso resulta em blocos de informações fragmentadas que não são correlacionadas com os demais dados ambientais, como por exemplo geotecnia e hidrologia, além de serem desconsideradas na elaboração dos projetos, na preparação e execução das obras de instalação e na operação. Isso se reflete em possíveis condições de desenvolvimento ou potencialização de processos erosivos, solapamentos, carreamento de sedimentos para corpos hídricos, troca de torres de linhas de transmissão por ventos fortes, desligamentos de sistemas de transmissão por queimadas provocadas por descargas elétricas, entre outros.

Ao mesmo tempo, a dificuldade de abordagem das componentes meteorológica e climatológica também é observada nos órgãos reguladores. Não só a carência de conhecimento e treinamento técnico pode ser atribuída a dificuldade de análise, mas também a visão da aplicação estudo da Meteorologia no Brasil, que está associada somente à previsão do tempo, o que acaba por descartar o uso das informações em outras áreas, como a de análise de riscos ambientais. Isso manifesta-se em termos de referência mal elaborados que levam aos problemas na apresentação dos dados, conforme anteriormente mencionados. Ressalta-se que muitas vezes, mesmo com uma adequada orientação para apresentação dos estudos as informações continuam a apresentar problemas. Outro aspecto a ser destacado é a falta de dados históricos primários disponíveis, devido a reduzida rede de estações meteorológicas que não cobre todo o território, como também dificuldades locais e operacionais para ampliação da rede de medições.

Assim, o principal objetivo deste trabalho é fornecer uma ferramenta que permita uma melhor identificação e previsão de possíveis impactos ambientais decorrentes da instalação de empreendimentos de diferentes tipologias, ajudando na tomada de decisão do

órgão licenciador. Além de proporcionar uma melhor formulação de termos de referência e programas ambientais e planos de monitoramento.

Conforme destacado anteriormente, quanto mais conhecermos as características de uma região, mais eficaz é a avaliação de possíveis impactos ambientais que um empreendimento pode vir a trazer. Por conseguinte, focando nas condições atmosféricas, este estudo está estruturado na identificação dos regimes de tempo predominantes para uma determinada área, que irá posteriormente nortear as simulações das trajetórias da dispersão de poluentes atmosféricos. O estudo da dispersão foi escolhido pois é uma aplicação direta da metodologia proposta neste trabalho, além de ser um dos temas de difícil análise e tomada de decisão por parte do órgão regulador, uma vez que envolve entre os aspectos a qualidade do ar, a capacidade de suporte da bacia aérea e o planejamento de redes de monitoramento. Sem a identificação dos regimes de tempo predominantes, os resultados das simulações refletem as características totais ou médias, ou seja, o que se observa é um cenário onde todos os regimes de tempo estão presentes. Assim, para o caso de uma emissão acidental torna-se complicado identificar de forma rápida e prévia a possível direção da pluma de dispersão.

Capítulo 2 – Centrais Nucleares

Conforme destacado anteriormente o estudo da dispersão, segundo a abordagem proposta nesta dissertação, pode ser aplicado a diferentes tipologias, dentre elas as centrais nucleares. As usinas nucleares têm sido muito questionadas e debatidas, principalmente, após o acidente na planta de Fukushima Daiichi ocorrido em 11 de março de 2011, no Japão, o que gerou um impasse sobre a instalação de novas centrais nucleares, bem como quanto ao futuro das centrais em operação. Cita-se, por exemplo, que tanto Japão quanto Alemanha reduziram suas capacidades de geração de energia e de investimentos no setor após o acidente (World Nuclear Association, 2015a). Entretanto, a demanda por energia que levou à inclusão das plantas nucleares nas matrizes energéticas permanece. De acordo com dados da Eletronuclear, caso o padrão do nível de consumo no Brasil evolua para o nível dos países desenvolvidos, aproximadamente 5.000 KWh/pessoa/ano, haveria um aumento de cerca de 100% em relação ao atual patamar de consumo de eletricidade (ELETRONUCLEAR, n.d.b).

Releva-se que a energia nuclear é ser considerada uma fonte de energia barata e limpa, mas que ao mesmo tempo pelo perigo da radiação emitida durante a produção da energia e pela radioatividade dos materiais utilizados torna-se uma fonte não tão atrativa para substituir o uso de combustível fóssil (Esteves & Masili, n.d).

Descrição do processo de geração de energia nuclear

A tecnologia nuclear baseia-se na física da energia que mantém a estrutura de ligação entre prótons e nêutrons no núcleo do átomo, ou seja, energia de ligação dos núcleons (partículas do núcleo) chamada energia nuclear. A fissão nuclear é o processo no qual o núcleo de um átomo pesado é dividido em dois leves quando atingido por um nêutron. Na reação de fissão nuclear além dos núcleos leves também são gerados dois a três nêutrons, como consequência da absorção do nêutron que causou a fissão. Com isso, outros núcleos podem ser atingidos por estes nêutrons liberando mais calor, e consequentemente uma reação de fissão nuclear em cadeia. Além disso, raramente a fissão do núcleo ocorre espontaneamente na natureza, mas pode ser induzida ao bombardear núcleos pesados com

um nêutron, que ao ser absorvido torna o núcleo instável e isso gera uma reação em cadeia. Para o aproveitamento da energia nuclear torna-se necessário controlar essa reação em cadeia, uma vez que normalmente a mesma não pararia até consumir quase todo o material físsil (aquele que sofre fissão nuclear) e a forma de controlá-la é através da eliminação do agente causador da fissão, ou seja, do nêutron. Caso não existam mais nêutrons disponíveis a reação de fissão em cadeia não poderá ocorrer. Nas centrais nucleares, o reator nuclear é equipamento onde se processa uma reação de fissão nuclear e o controle das reações em cadeia (Cardoso, n.d.).

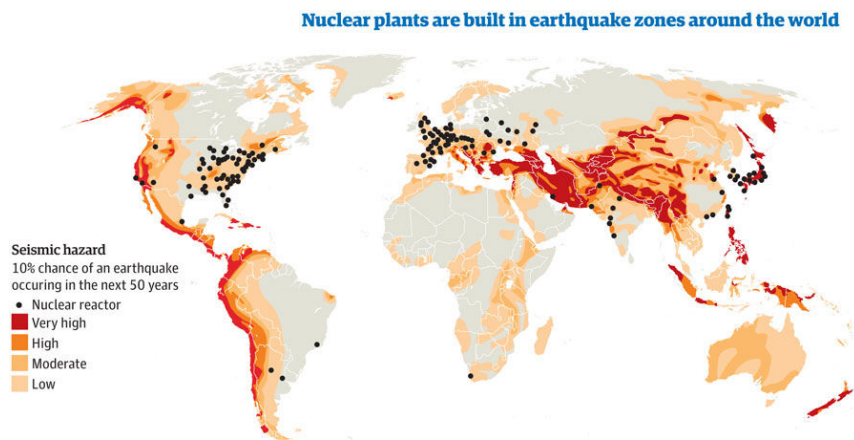
A descoberta do processo da fissão ocorreu no fim da década de 30, com relatos dos cientistas alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann sobre um experimento envolvendo a irradiação de nêutron do urânio. A aplicação para fins militares teve início na Segunda Guerra Mundial, voltada inicialmente para a produção de bombas pela fissão dos átomos de um isótopo específico de urânio ou plutônio. Com o objetivo de criar uma fonte de energia capaz de estender as viagens navais sem a necessidade de recarregamento foi desenvolvido, no final da década de 1940, um programa para o desenvolvimento de um reator naval, sob a direção de Hyman Rickover. Em 1954 foi lançado o primeiro submarino nuclear chamado Nautilus que mostrou a capacidade da propulsão nuclear voltada para embarcações navais, e seu reator tornou-se o protótipo para a primeira usina nuclear, construída em Shippingport, na Pennsylvania, em 1957.

Após a Segunda Guerra, o uso da tecnologia nuclear destinou-se a fins pacíficos: como pesquisa, medicina e geração de energia. Apesar de nos dias de hoje somente 8 países reconhecidamente possuírem tecnologia nuclear capazes de gerar armas.

Em 1946 foi fundada a Comissão de Energia Atômica, nos Estados Unidos, tendo como um de seus objetivos buscar aplicações pacíficas para a energia nuclear. E a primeira conferência internacional sobre energia nuclear ocorreu em Geneva em 1955. Em 1954 começou a funcionar a primeira usina nuclear voltada para a produção de energia elétrica na antiga União Soviética, em 1956 na Inglaterra e os franceses começaram a produção de suas primeiras usinas comerciais em 1957.

Centrais nucleares no mundo

Com a descoberta do processo de fissão e a evolução tecnológica, a energia nuclear tornou-se uma opção de fonte da energia elétrica em escala mundial. Em 1999, 434 reatores operavam em 32 países com geração elétrica aproximada de 2,398 TWh ou 16% da energia global (World Nuclear Association, 2015a).



*Figura 1 - Plantas nucleares em operação no mundo até o anos de 2011. Acessado em 03/04/2015.
<http://www.theguardian.com/news/datablog/2011/mar/18/nuclear-reactors-power-stations-world-list-map>*

Atualmente, cerca de 11.5% da demanda energética mundial é suprida por reatores instalados em 31 países. Destacam que dentre estes, 16 dependem da energia pelo menos 25% da energia, enquanto Bélgica, República Checa, Filândia, Hungria, Eslováquia, Suécia, Suíça, Eslovênia e Ucrânia mais de 33%. Coreia do Sul e Bulgária 30%. Estados Unidos, Reino Unido, Espanha, Romênia e Rússia 20%, além da França onde 75% de sua energia é de origem nuclear (World Nuclear Association, 2015a e ENS, n.d.).

No Japão, a contribuição da energia nuclear diminuiu após o acidente em Fukushima, em 2013 registrou-se a geração de 9 TWh contra os 288 TWh de 2010. Hoje o país conta com 43 reatores em operação ou disponíveis para reiniciar (World Nuclear Association, 2015c).

Na União Europeia, a decisão de incluir a energia nuclear na matriz energética depende de cada país membro, tendo sido o uso pacífico da energia garantido no Tratado

Euratom de 1957. Neste mesmo tratado foi criada a Comunidade Européia de Energia Atômica European Atomic Energy Community (Euratom).

Em relação à segurança, a Comissão Européia trata de questões como: funcionamento seguro das instalações, proteção contra radiações, gestão dos resíduos radioativos, garantia do usos dos materiais nucleares apenas para os fins declarados, bem como proteção física dos materiais e instalações contra atos dolosos intencionais. Destaca-se que há uma legislação específica para proteção da saúde do público, dos trabalhadores e dos pacientes contra os perigos resultantes das radiações ionizantes. Além disso, a UE exige que os países pertencentes ao bloco monitorem a radioatividade no ar, água, solo e alimentos (World Nuclear Association, 2015d).

Centrais nucleares no Brasil

Quanto a questão da demanda, no Brasil o Plano Nacional de Energia PNE-2030, que subsidia o governo na formulação da estratégia para fornecimento de energia até 2030, em seu cenário de referência, aponta a necessidade da implantação de 4.000 MW nucleares adicionais, após a implantação de Angra 3 (2015-2030), sendo 2.000 MW no Nordeste e 2.000 MW no Sudeste. Em estudos preliminares do governo brasileiro foram selecionados locais com condições de abrigar até seis usinas nucleares (ELETRONUCLEAR, n.d. d).

A partir do novo Plano Nacional de Energia 2050 há uma estimativa de que o potencial hidrelétrico (base da matriz energética brasileira) seja esgotado no quinquênio de 2025 a 2030, diante deste cenário, há uma previsão por parte do governo brasileiro em instalar de quatro novas usinas nucleares, para complementar a geração elétrica (Nunes, 2014).

Em relação à matéria-prima para a geração da energia nuclear, o Brasil figura entre os seis países que detêm 81% das reservas de urânio conhecidas, com a sexta maior reserva (309.370 toneladas), tendo ainda a prospectar mais de 70% do seu território (ANEEL, n.d. b). O urânio já prospectado seria suficiente para abastecer 37 usinas iguais a Angra 2 durante 65 anos (Portal Brasil, 2011).

Considerações sobre a energia nuclear

Apesar de existirem diversas plantas nucleares em funcionamento em todo o mundo, conforme descrito previamente, a segurança e confiabilidade são tópicos inerentes quando se trata da energia nuclear, principalmente no que tange à salvaguarda dos reatores e a geração e disposição final dos resíduos. Nesse sentido, acidentes ocorridos nas centrais nucleares têm impacto direto na percepção da população em geral sobre o uso da energia nuclear, além de gerar discussões e debates que levem a melhoria de processos e adoção de novas normas de segurança.

O acidente no reator da Three Mile Island (TMI) na primavera de 1979, nos Estados Unidos, trouxe significativas consequências ao processo de licenciamento de novas usinas, bem como a modificação de regulamentos, tornando mais rígida a construção de novas usinas tanto quanto a operação de usinas já existentes (Esteves & Masili, n.d).

Outro acidente ocorreu em 26 de abril de 1986 quando a Unidade 4 da Central Nuclear de Chernobyl, na Ucrânia (na antiga União Soviética), foi destruído durante um teste do sistema de reatores. Após o desastre, os outros três reatores de Chernobyl foram reiniciados mas, desligados posteriormente, sendo o último em 1999.

Com o acidente uma área de 30 quilômetros em torno da usina foi isolada enquanto 115.000 pessoas foram evacuadas dos locais mais contaminados em 1986 e outras 220.000 nos anos seguintes (UNSCEAR, 2008). Foram registradas contaminações em Bielorrússia (na Federação Russa) e na Ucrânia. O resultado da destruição do reator 4 foi a liberação de grandes quantidades de material radioativo para o meio ambiente. Por efeito da radiação 28 trabalhadores morreram no local da Usina nos primeiros quatro meses após o evento, enquanto outros 200.000 envolvidos na limpeza e recuperação da área entre 1986 e 1987 receberam doses de entre 1 e 100 rem, sendo que a dose de radiação média anual para um cidadão dos EUA é de cerca de 0,6 rem (UNSCEAR, 2008; World Nuclear Association. 2015e).

Inicialmente, os gases radioativos e particulados liberados com o acidente foram transportados por ventos de norte e de oeste, e nos dias subsequentes de todas as direções. A deposição dos radionuclídeos foi dominada pela precipitação, o que gerou um padrão de

exposição complexo e variável ao longo da região afectada e, em menor grau, o resto da Europa (UNSCEAR, 2012).

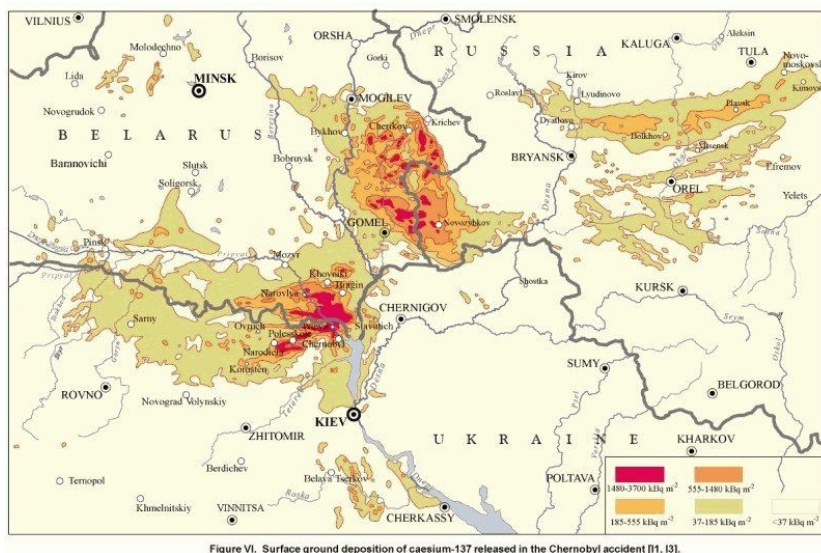


Figura 2 - Mapa de deposição no solo do césio-137 liberado no acidente em Chernobyl.
Fonte: <http://www.unscear.org/unscear/en/chernobylmaps.html>

Após o acidente, as Comissões de Regulação Nuclear promoveram modificações nos projetos das Usinas, com a inclusão de novas formas de desligamento seguro e de fortes estruturas capazes de conter os materiais radioativos mantendo a segurança pública. Avaliações pós-Chernobyl pontuaram a necessidade de alterações nas regulamentações ou guias voltados para acidentes, considerando: o controle da reação em cadeia, o reator em baixa (ou nenhuma) geração, o treinamento de operadores e os planos de emergência. Aspectos como a manutenção, procedimentos de controle adequados durante a operação e em situações de emergência, além da garantia de sistemas de segurança de backup capazes de lidar com possíveis acidentes também foram relevados (U.S. NRC, 2014).

Enquanto o acidente de Three Mile Island fez com que os custos das usinas nucleares em funcionamento aumentassem devido à exigência de investimentos adicionais nos sistemas de segurança, gerando atraso no licenciamento dos projetos em andamento; Chernobyl aumentou a desconfiança em relação às centrais nucleares (Ciência Hoje, 2005).

Além dos riscos associados aos acidentes, outro ponto que gera oposição à adoção das centrais nucleares é o fato de que o processo de fissão do átomo de urânio é o mesmo

que permite criar uma bomba atômica. Ou seja, um país que domine a tecnologia de processamento e de transformação do minério pode utilizá-la tanto para a produção de energia elétrica quanto para fins bélicos. Embora, ao final da Guerra Fria, tenha havido um comprometimento formal de desativação dos artefatos bélicos e que uso do urânio decorrente dessa iniciativa fosse voltado para a produção de energia elétrica (ANEEL, n.d. a).

A preocupação com tais questões ocorrem em diferentes países. Em pesquisa realizada pela Associação Portuguesa da Energia (APE) registrou-se que cerca de 70% dos consumidores particulares não concorda com a construção de uma central nuclear em Portugal, por existirem riscos à saúde pública e a segurança. A pesquisa também destaca que foram citadas as seguintes vantagens da microgeração: a redução das emissões de CO₂ e o custo da factura mensal, enquanto as principais limitações foram: o investimento inicial e respetivo prazo de retorno, além do processo burocrático associado ao licenciamento. Uma questão apontada é que apesar da alta porcentagem de contra a instalação da central nuclear, é que muitos dos consumidores desconheçam que a uma parte da eletricidade consumida em Portugal é gerada em centrais nucleares espanholas, sendo depois transacionada no mercado ibérico de energia elétrica e injetada na rede juntamente com a que tem origem noutras formas de produção, sobretudo renováveis (Nunes, 2011).

E uma destas Usinas é a central nuclear de Almaraz que se localiza na província de Cáceres (Espanha), junto ao Rio Tejo, fazendo fronteira com os distritos portugueses de Castelo Branco e Portalegre. De acordo com autoridades, Portugal e Espanha possuem sistemas de informação permanente e planos de emergência para um eventual acidente na central nuclear de Almaraz, perto da fronteira entre os dois países (Diário de Notícias, 2011).

O acidente mais recente ocorreu no Japão, na planta de Fukushima Daiichi em decorrência de um terremoto duplo e raro de duração aproximada de 3 minutos, com epicentro a 130 km offshore na direção da cidade de Sendai em Miyagi, em 11 de março de 2011. O terremoto de magnitude 9.0 deslocou o arquipélago japonês alguns metros para leste e reduziu a linha de costa local em meio metro. Além disso, o tsunami, com altura entre 15 e 24 m resultante inundou cerca de 560 km² e provocou a morte de mais de 19.000

pessoas, causar danos significativos aos portos e cidades costeiras (World Nuclear Association, 2015b).

Três reatores da Planta Nuclear de Fukushima Dai-ichi (FNDPP), em operação durante o terremoto, não tiveram um resfriamento (arrefecimento) adequado com o decaimento do calor a partir do desligamento automático seguro devido a interrupção no fornecimento de energia e danos aos geradores à diesel. O que levou a uma série de ocorrências nos reatores do site-I e posterior liberação de significativa quantidade de radionuclídeos (NISA, 2011a,b). Destaca-se que 11 reatores, em 4 outras Centrais, encontravam-se em operação, mas, foram desligados automaticamente quando o terremoto atingiu o Japão (World Nuclear Association, 2015b). O acidente em Fukushima foi classificado como nível 7 pela Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES, em inglês), se diferenciando de Chernobyl (também de nível 7) somente pelo fato de não terem havido efeitos significativos à saúde, apesar da liberação do material radioativo e dos efeitos sobre o meio ambiente.

Para a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, em inglês), Fukushima foi um acidente que apesar de desencadeado por um evento natural extremo evidenciou falhas na planta nuclear que levaram ao desastre em si (IAEA, 2012). A necessidade de melhorias na normas reguladoras para garantir um projeto capaz de prevenir acidentes além da mitigação dos mesmos tornaram-se evidentes após o evento (NEA, 2014).

Mas, as centrais nucleares não possuem somente aspectos negativos. Para o setor elétrico, por exemplo, que busca o baixo custo e um fornecimento capaz de suprir a demanda de forma rápida e confiável ao longo do tempo, a energia nuclear é vantajosa pois: o combustível não depende de entrega contínua e seu valor é uma pequena parcela do custo da geração de energia (o que dá estabilidade aos preços), apresenta bom suporte de tensão para a estabilidade da rede e as emissões de CO₂ são baixas. A possibilidade de investimentos no desenvolvimento tecnológico possibilitam o aumento na segurança das unidades, embora ainda não exista uma solução definitiva para os rejeitos produzidos – o elemento mais perigoso do processo nuclear (ANEEL, n.d. a). Embora, já existam pesquisas sobre o esgotamento da radioatividade desses resíduos, afim de reaproveitá-los, resultando em aumento da geração de energia e conseqüente desativação dos mesmos (MMA, n.d. c).

Em relação as emissões de gases de efeito estufa (GEE), estima-se que entre 60% e 65% das emissões, em geral, estejam associadas à produção, conversão e consumo de energia (Walter, 2007). O ciclo de vida das emissões atmosféricas de GEE de fonte nuclear são de ordem de grandeza duas vezes menor que os de fonte de geração à combustíveis fósseis, além de comparável à maioria das fontes de energia renováveis (IPCC, 2007). Sendo uma opção eficaz de mitigação de GEE, especialmente por meio de investimentos na extensão da vida útil das centrais existentes (IPCC, 2007). Uma vez que no caso das Centrais Nucleares, não há produção direta de CO₂, exceto nas atividades secundárias (motores, equipamentos, transporte, etc), resultando em uma menor geração de gases de efeito estufa, servindo como estratégia no combate às mudanças climáticas (MMA, n.d.a).

Relevando às emissões atmosféricas esperadas para a operação das Usinas Nucleares, à liberação accidental de materiais perigosos e os riscos à saúde humana e demais espécies, além da contaminação de aquíferos, solos e atmosfera, a aplicação de ferramentas adequadas de modelagem de dispersão atmosférica para estudo do transporte destes poluentes, fornece um suporte à tomada de decisão para sistemas de avaliação de impacto, para a análise de resposta à emergência e mitigação (Srinivas et al., 2012).

Assim, considerando todos os aspectos acima citados, para este trabalho foi escolhida Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) que abrange as usinas de Angra 1, Angra 2 e a futura Angra 3, localizada distrito de Cunhambebe, na praia de Itaorna no município de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro (figura 3). Os municípios limítrofes são: Paraty, Rio Claro e Mangaratiba, no Estado do Rio de Janeiro e Bananal, São José do Barreiro e Cunha, no Estado de São Paulo. A CNAAA dista cerca de 133 km da cidade do Rio de Janeiro, 216 km da cidade de São Paulo e 343 km de Belo Horizonte (ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A., 2007b). A população aferida da cidade de Angra dos Reis, de acordo com o Censo do IBGE de 2010, era de 169. 511 habitantes (ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A., 2007a).



Figura 3 - Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), Angra dos Reis/RJ. Acessado em 03/04/2015. Fonte: <http://www.eletronuclear.gov.br/internacional/Home.aspx>

Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) – Descrição

A Usina de Angra I, primeira central nuclear do Brasil, entrou em operação comercial em 1985 gerando 640 megawatts de potência suficiente para abastecer uma cidade de 1 milhão de habitantes. Angra 2 iniciou sua operação comercial em 2001, com potência de 1.350 megawatts, capaz de atender ao consumo de uma cidade de 2 milhões de habitantes. Em 2010, as obras da Usina de Angra 3 foram retomadas e possui previsão de entrada em operação comercial em 2018 com uma potência elétrica de 1.405 MW podendo gerar mais de 10 milhões de megawatts por ano (ELETRONUCLEAR, n.d.a). O Complexo CNAAA, com uma área de 825 km², localiza-se no município de Angra dos Reis, no litoral sul do estado do Rio de Janeiro distando aproximadamente 133 km da capital do Estado (cidade do Rio de Janeiro).

De acordo com o Estudo de Impacto Ambiental da Unidade 3 da CNAAA, a unidade geomorfológica predominante na área da Central Nuclear é a da Escarpas das

Serras da Bocaina, Mangaratiba e Mazomba, que consiste em um alinhamento serrano elevada por tectônica a mais de 1.000m de altitude e que mergulha diretamente sobre as águas das baías da Ilha Grande e de Sepetiba através de costões rochosos. Esse escarpamento prolonga-se desde a serra de Parati – um grande esporão que parte da escarpa principal da Serra da Bocaina e demarca a divisa com o estado de São Paulo – até a escarpa da serra do Mazomba, alcançando a baixada de Sepetiba. A Baía de Angra dos Reis consiste de um corpo semiconfinado de água salgada devido à presença da Ilha Grande. Enquanto a Baía da Ilha Grande é um sistema estuarino parcialmente misturado, onde a baía está conectada com o Oceano Atlântico através de seus extremos leste e oeste e o aporte de água doce é oriundo da Baía de Sepetiba. A circulação do sistema estuarino formado pelas duas baías é resultante de efeitos de maré, ventos e diferenças de densidade.

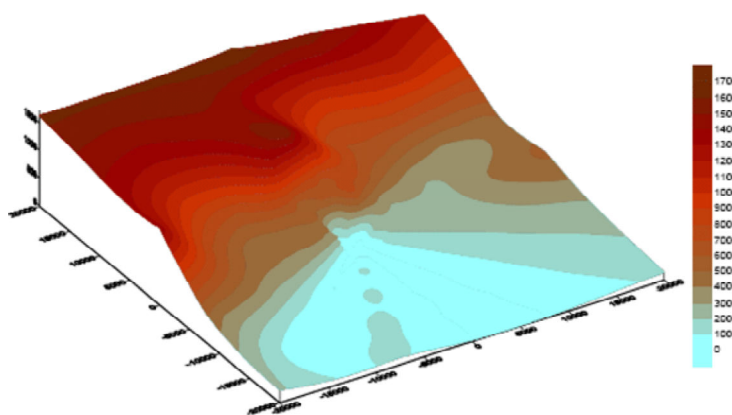


Figura 4 - Perfil topográfico da região da CNAAA. Fonte: EIA Angra III - "Levantamento e Diagnóstico Ambiental (Meio Físico) da Área de Influência da CNAAA - Vol I (Eixo I - Meteorologia)", IGEO/UFRJ.

A figura 4 representa o perfil topográfico da área do Complexo da Usina de Angra, onde o paredão formado deve-se a presença da Serra do Mar.

Quanto a vegetação, os municípios de Itaguaí, Mangaratiba, Angra dos Reis e Paraty fazem parte da denominada “Costa Verde”, que representa um dos maiores núcleos de Floresta Atlântica no estado do Rio de Janeiro. A vegetação encontra-se em diferentes estados de conservação com percentual de remanescentes florestais superior a 80%, principalmente em áreas onde o relevo acentuado dificulta a ocupação e a instalação de algumas atividades econômicas. Já o município de Angra dos Reis apresenta um total de 81% de remanescentes de Mata Atlântica, sendo que aproximadamente 86,00% da área de influência direta (AID) do empreendimento encontram-se recoberta por formações naturais (floresta nativa) e 84,35% das áreas de preservação permanente/APP na AID estão

ocupadas também por florestas. Nas áreas de influência direta e indireta as planícies costeiras são geralmente, estreitas, caracterizadas por uma vegetação de praia, seguida por uma transição de restinga com floresta atlântica (ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A., 2007b).

De forma a avaliar a trajetória de dispersão da pluma de poluentes atmosféricos oriunda de liberação acidental, o presente estudo foi dividido em três etapas: na primeira foram identificados os regimes de tempo (weather regimes, em inglês) predominantes por meio da análise de clusters, ou análise de segmentação. Na etapa seguinte, foram definidos os episódios de simulação da pluma com base no calendário gerado para cada um dos regimes de tempo. Na terceira fase foram realizadas as simulações das trajetórias da pluma para os episódios selecionados a partir dos regimes de tempo mais recorrentes.

Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica

A atmosfera é caracterizada como um sistema com infinitos graus de liberdade. Ao focar nas características da circulação atmosférica de grande escala pode-se observar a existência de padrões de circulação recorrentes e/ou persistentes. Aproximações lineares baseadas na interação entre o estado médio observado da atmosfera e as anomalias de grande escala buscam explicar essa recorrência ou persistência. Enquanto, outra linha de pensamento, utiliza teorias fundamentadas na não linearidade das equações básicas que regem os movimentos atmosféricos, possuindo diferentes estados estacionários (North et al., 2014).

Entretanto, apesar de algumas características dos sistemas de grande escala permanecerem relativamente constantes, a atmosfera não apresenta um comportamento estacionário, uma vez que distúrbios sinóticos geram a variabilidade diária no tempo. Embora, as características do fluxo de grande escala influenciem significativamente a intensidade e a distribuição geográfica dos regimes de tempo (North et al., 2014). Sendo regime definido como uma configuração na qual o tempo meteorológico tende a permanecer por um dado período de tempo (EUMETCAL, n.d.). Enquanto para Michelangeli et al. (1995) e Stephenson et al. (2004) representam a recorrência e/ou persistência de estados quase-estacionários da atmosfera.

Miyakoda et al. (1983), Tibaldi and Molteni (1990) e Corti and Palmer (1997) destacam que a sensibilidade dos regimes de tempo a pequenas perturbações refletem nas previsões a médio prazo.

Os experimentos de Lorenz envolvendo a variação do padrão do fluxo atmosférico em função das condições iniciais demonstraram que para longos períodos de simulação, verifica-se uma oscilação sobre dois estados, sendo um deles o climatológico médio. Ou seja, o modelo de Lorenz apresenta dois “regimes climáticos” preferenciais. Assim, se o estado do modelo residir dentro de um destes dois regimes, chamados por Lorenz de atratores, o tempo meteorológico apresenta oscilações quase-periódicas que possibilitam sua previsibilidade (Wallace and Hobbs, 2006).

Cassou et al. (2004) destaca que a não linearidade do sistemas atmosféricos baseia-se na identificação dos atratores definidos por Lorenz, correspondentes aos regimes de tempo

ou climáticos. Assim estes regimes de tempo podem ser interpretados como um estado preferencial do sistema dinâmico não-linear com um atrator caótico (Ghil and Robertson, 2002).

Lorenz (2006) argumenta que a presença de regimes é uma característica de sistemas caóticos não lineares, e na atmosfera os regimes representam padrões de circulação persistentes. A presença tanto dos regimes de tempo quanto do caos indicam uma propriedade que alguns sistemas dinâmicos possuem. Instabilidade dos sistemas climáticos e não-linearidades que geram o caos determinístico inviabilizam uma previsão precisa para períodos superiores a duas semanas. Uma vez que a maioria dos sistemas atmosféricos não apresenta uma única causa, para descrevê-los, torna-se necessário associá-los a vários fatores físicos que atuam simultaneamente, como aponta Lorenz (1987). Entretanto, Vautard et al. (1992) salienta que o caos não implica, necessariamente, em um comportamento irregular ou aleatório do sistema para grandes escalas temporais, mas que certas regularidades como periodicidades podem contribuir para a variabilidade do sistema. Kageyama (1999) ressalta que a variabilidade intra-sazonal da circulação atmosférica pode ser descrita por transições entre um pequeno número de estados ou regimes de tempo.

Assim, caracterizar a circulação de grande escala através dos regimes de tempo nos possibilita conhecer os processos físicos que governam as mudanças ou variações no clima regional (Hertig & Jacobeit, 2014) ou permite qualificar a variabilidade atmosférica sobre uma dada região (Vrac & Yiou 2010).

Para Robertson & Ghil (1999) os regimes de tempo proporcionam um paradigma dinâmico que possibilita caracterizar estatísticas multimodais, do sistema climático em escala planetária e as relações entre a circulação de grande escala e as condições locais diárias, sem a necessidade de qualquer informação prévia sobre as estruturas de grande escala no espaço-fase.

Para Christensen et al. (2014) os regimes de tempo observados em certos padrões temporais ao longo de 50 a 100 anos apontam que para prever mudanças no clima de origem antropogênica, os modelos climáticos devem ser capazes de representar com certa precisão os regimes naturais de circulação e sua variabilidade. Pois, uma vez que reconhecidamente os regimes ocorrem na atmosfera, os modelos devem ser capazes de reproduzi-los (Lorenz, 2006). Hertig & Jacobeit (2014) infere que se os regimes de tempo pudessem ser

reproduzidos de forma confiável por modelos de circulação geral, seriam uma ferramenta para entender variações climáticas locais, derivadas das relações entre a grande escala e escalas locais a regionais.

Diversos métodos matemáticos e estatísticos podem ser utilizados para descrever os regimes de circulação de grande escala e o tempo local. Trabalhos desenvolvidos por Michelangeli et al. (1995) que utiliza a análise por clusters, Smyth et al. (1999) que emprega a função de distribuição probabilística (PDF, em inglês) e Monahan et al. (2001) que aplica modelos estatísticos são exemplos de metodologias para identificação dos regimes de tempo.

Regimes de tempo

O termo “regime” têm sido amplamente utilizado na literatura (Kidson, 2000) principalmente a partir da descoberta do múltiplo equilíbrio em modelos não lineares com reduzido número de graus de liberdade (Charney and DeVore, 1979). Sendo o equilíbrio múltiplo, um conceito utilizado para explicar os fenômenos não-lineares e anomalias persistentes na circulação atmosférica (North et al., 2014).

A observação do comportamento dos regimes de tempo atmosféricos datam de trabalhos de Gilbert Walker, com a identificação da Oscilação do Atlântico Norte, Oscilação do Pacífico Norte e Oscilação Sul (Lorenz, 2006). Existem diferentes conceitos para os regimes de tempo baseados em suas diferentes propriedades: persistência, recorrência e quase-estacionaridade (Michelangeli et al., 1995). Embora poucos autores os tenham definido a partir destas propriedades e sim a partir do estudo das características meteorológicas locais, ou seja, em regimes típicos locais de precipitação ou temperatura (Kageyama et al., 1999).

Estudos de Vautard (1990) e de Michelangeli et al. (1995) classificam os sistemas dinâmicos atmosféricos nos extra-tropicais em um número definido de estados, por eles chamados de regimes de tempo partindo do princípio que para um certo número de estados a circulação torna-se finita.

Para Hertig & Jacobeit (2014) o conceito de regime de tempo representa um processo-orientado de organização dos vários estados de circulação atmosférica. De forma que através desta classificação em alguns padrões de recorrência, possa ser observada a

dependência das anomalias no tempo local do fluxo atmosférico de grande escala. Enquanto Legras and Ghil (1985) aborda a conexão entre os padrões de recorrência e persistência destes regimes com a escala sinótica ou com a escala dinâmica planetária.

Robertson and Ghil (1999) e Moron et al. (2008) definem os regimes de tempo como sendo padrões de fluxo de grande escala persistentes e recorrentes que ocorrem repetidamente sobre uma certa área geográfica refletindo no comportamento dos sistemas sinóticos que afetam o tempo em escala local para um certo período de tempo. Podendo, de acordo com Vrac & Yiou (2010) serem em geral descritos em função de variáveis atmosféricas de circulação (como altura geopotencial e pressão) e muitas vezes utilizados como um primeiro passo no refinamento de muitos processos estatísticos, mas raramente voltados para maximizar sua correlação com fenômenos meteorológicos locais.

Molteni et al. (2006) destaca que os regimes de tempo podem ser analisados como pontos de equilíbrio estatístico, nos quais, as tendências dinâmicas do fluxo de grande escala são equilibradas pelas interações não lineares transientes de alta frequência.

Para Stephenson et al. (2004) um regime pode ser definido como uma região do espaço de fase que é mais populada que as regiões vizinhas e a localização deste agrupamento dentro do estado do espaço de fase é um problema estatístico complexo mas, que pode ser resolvido através de algoritmos clustering como o k-means (Dawson et al., 2012; Pohl and Fauchereau, 2012; Straus et al. 2007). Michelangeli et al. (1995) descreve os regimes de tempo como sendo um estado recorrente e persistente na atmosfera, assumindo que a atmosfera permanece em um estado discreto que representam picos na função de densidade probabilística em um espaço de fase. Sendo que tais picos podem ser identificados por meio da análise por clusters (Vautard, 1990; Michelangeli et al., 1995; Ghil and Robertson, 2002; Cassou et al., 2004; SanchezGomez et al., 2008).

Os centróides dos métodos de análise por cluster podem ser interpretados como os atratores dos experimentos de Lorenz (Polo et al. (2011). Sendo assim, pode-se inferir que a variabilidade de baixa frequência é uma variação na amplitude dos regimes de tempo ou nas transições entre si (Robertson et al., 2000; Ghil and Robertson, 2002; Cassou et al., 2004).

Existem diferentes métodos para identificação dos regimes de tempo dependendo do foco da análise. Segundo Robertson & Ghil (1999), os regimes podem ser determinados

em função da análise por clusters (agrupamentos), por hierarquia (Cheng and Wallace, 1993), pela função de densidade probabilística de fluxos de grande escala de baixa frequência (Molteni et al. 1990) ou pela quase-estacionaridade (Vautard, 1990).

Assim, regimes de tempo já conhecidos podem gerar melhorias na previsão e na avaliação de impactos regionais decorrentes de possíveis mudanças no clima, ou se estas podem vir a influenciar na frequência de ocorrência ou na estrutura dos regimes tempo. Além de permitir descrever o comportamento e a propagação das oscilações climáticas, como Madden-Julian, El Niño e regime de monções dentro dos regimes de tempo.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos buscando identificar regimes de tempo preferenciais. Em Corte-Real et al. (1998) são analisados os principais padrões de circulação associados a precipitação em Portugal para o Atlântico nordeste e oeste da Europa, enquanto Pohl & Fauchereau (2012) foca no modo anular sul (SAM), também chamada de Oscilação Antártica (AAO). Ullmann & Moron (2008) estuda os padrões de ondas de maré correlacionando-os aos padrões dos regimes de tempo para a área do Golfo de Lions, na costa mediterrânea francesa, trabalhos com soluções de 5 clusters por (Vautard, 1990; Michelangeli et al., 1995; Plaut and Simonnet, 2002; Moron and Plaut, 2003). A relação entre os regimes de tempo e as variações nos padrões de precipitação são estudadas por Driouech et al.(2010) entre o Atlântico Norte e o Marrocos e por Polo et al. (2011) para a Europa e o oeste Africano.

A circulação de grande escala nas latitudes médias pode ser caracterizada pela flutuação do jato entre os diferentes estados quase-estacionários (regimes de tempo) e os regimes zonais e de bloqueio (RECYF, n.d.). Tais regimes são mantidos ou reforçados pelas storm-tracks ou por turbilhões sinóticos, sendo estes últimos também responsáveis pela transição entre os regimes.

Um estudo dos regimes de tempo associados ao rigoroso inverno de 2010 na Europa e a relação com as anomalias de temperatura foi elaborado por Cattiaux et al. (2010). De acordo com dados do NOAA (NOAA, n.d.) entre dezembro de 2009 e fevereiro de 2010 foram registradas séries de eventos de frio significativo e acumulação anormal de neve no Hemisfério Norte, incluindo registros recordes de neve em vários Estados da região leste dos EUA. Enquanto, Barrier et al. (2015) descreve que a variabilidade da circulação oceânica no Atlântico Norte é influenciada pelas alterações nas circulações atmosféricas de grande escala e nos modos tradicionais de variabilidade como a Oscilação do Atlântico

Norte (NAO) e o Padrão Atlântico Leste, chamados por Cassou et al. (2011) de regimes de tempo, sendo estas mudanças responsáveis pela convergência de calor e anomalias nos fluxos de calor na superfície oceânica. Explicando assim o evento de aquecimento anômalo observado no Atlântico Norte em meados dos anos 1990.

A análise dos regimes de tempo também pode ser utilizada para investigar o clima passado. Em Kageyama et al. (1999), a avaliação do clima extratropical no Atlântico Norte e na Europa, utilizando o modelo de circulação geral (AGCM), permitem observar que alterações na variabilidade intrasazonal (dada pelos regimes de tempo) podem descrever o impacto de diferentes condições limitantes no sistema climático e os processos de mudança no clima.

Análise por clusters

Conforme destacado por Cassou et al. (2004) poucos métodos estatísticos relevam a assimetria e as interações temporais na obtenção dos padrões de variabilidade. Um destes métodos que permite a classificação ou organização de objetos é o da análise por clusters (ou agrupamento). Cassou et al. (2004) a define como uma técnica estatística baseada na propriedade de um conjunto de eventos permitindo agrupá-los em grupos menores de estados representativos (ou regimes) de acordo com um critério de similaridade. A aplicação da análise por clustering pode ser usada para identificar um número limitado de agrupamentos no espaço de fase, de forma que a variabilidade de cada uma destas partições é menor que a variabilidade do estado médio (Sáenz & Durán-Quesada, 2015).

Kidson (2000) aponta que coerentes padrões ou “regimes” relacionados à mudanças de grande escala na circulação são esperados ao aplicar a análise por cluster sobre frequências de sistemas sinóticos para um adequado intervalo de tempo. Os valores destas classificações tendem a se reforçar, caso as transições entre os padrões diários prevaleçam sobre aqueles predominantes dentro do mesmo “regime” e se estiverem associados a significativos padrões iniciais de elementos climáticos. Entretanto, Christiansen (2007) salienta que o método de clustering explora o critério de recorrência mas, em geral, não o da quase-estacionaridade, o que pode gerar falhas na interpretação dos resultados, uma vez que conforme definido por Michelangeli et al. (1995) os regimes de tempo são quase-estacionários ou estados recorrentes.

Robertson & Ghil (1999) utiliza os regimes de tempo para identificar variações na distribuição estatística da precipitação e da temperatura em oito regiões no oeste dos Estados Unidos, além de observar o quanto o El Niño (Oscilação Sul) modula a probabilidade de ocorrência dos regimes de tempo identificados para a região.

Determinação de regimes de tempo através do algoritmo k-means

Ao verificar a existência de diversos regimes de circulação na troposfera extratropical, Christiansen (2007) destaca que os clusters são conhecidos por serem vetores de quantificação que apresentam uma classificação de padrões conforme os dados iniciais. Sendo um dos métodos mais comuns o K-means, como destacado por Kanungo et al. (2002). Citam-se os estudos como o de Michelangeli et al. (1995) que utiliza o k-means para descrever a quase-estacionaridade dos regimes de tempo no Atlântico Norte, os de Cassou (2004, 2008) que estuda a variabilidade atmosférica para região do Atlântico Norte Europeu e a relação com as condições de superfície oceânica e identifica padrões de teleconexão, além de Straus (2010) que incorpora os fluxos sinóticos turbulentos ao diagnóstico dos regimes de tempo a fim de analisar a variabilidade sobre o Pacífico na América do Norte

Sáenz & Durán-Quesada (2015) identifica os principais padrões sinóticos que caracterizam a circulação regional e a relação com a precipitação, a evolução das condições de grande escala, bem como os regimes recorrentes de ventos em baixos níveis para a América Central. Yiou et al. (2008) analisa os impactos da circulação atmosférica nas condições de temperatura e precipitação nos extra-trópicos.

O algoritmo K-means baseia-se no método dinâmico dos clusters, em que para um dado número pré-definido de clusters em um espaço n-dimensional, busca-se encontrar uma partição dos dados tal que minimize a soma dos desvios dentro de cada grupo. Um ponto pertencerá a um cluster quando sua distância até o centroide do cluster for menor que o desvio padrão de todas as distâncias dentro deste cluster (Kondrashov et al., 2002; Yiou et al., 2008 e Terray et al., 2004). E os regimes de tempo são os centróides de um conjunto de pontos em um espaço de fase (Michelangeli et al., 1995). Assim, campos

atmosféricos de grande escala são automaticamente agrupados conforme sua proximidade, criando grupos (clusters) que são diferentes uns dos outros (Vrac & Yiou, 2010).

Funções Empíricas Ortogonais (EOFs)

Na climatologia o método das EOFs é normalmente utilizado para o estudo de possíveis modos ou padrões espaciais da variabilidade e seu comportamento no tempo, tendo sido inicialmente utilizado no final dos anos 40 (Hannachi et al., 2007). Peixóto & Oort (1992) aponta que a aplicação de técnicas de análise utilizando autovetores foram amplamente difundidas com a introdução às ciências atmosféricas por Lorenz (1956). Esta aproximação permite identificar modos ortogonais espaciais, de tal forma que quando ordenados cada autovetor explica a quantidade máxima possível da variância restante em uma série de dados. Cada padrão do autovetor é então associado a uma série de temporal de coeficientes que descrevem a evolução temporal de cada modo espacial.

Os padrões dos autovetores, utilizados para obter as PCs, representam uma grande parcela da variância, contendo, em geral, significado físico. Por isso, é possível correlacioná-los a importantes centros de ação e utilizá-los para identificar flutuações climáticas de grande escala (Peixóto & Oort, 1992). Os processos físicos atmosféricos e oceanográficos estão contidos dentro dos primeiros modos, correspondendo a maior parte da variância. Assim, a metodologia de EOF/PCA busca encontrar novas variáveis que representem a maior parte da variância observada na série de dados através de combinações lineares das variáveis originais (Christiansen, 2007).

Hannachi et al. (2007) destaca que as EOFs não fornecem um cenário completo do que ocorre na atmosfera por suas características, como estacionaridade, não-linearidade e instabilidade. Entretanto, apesar de tais propriedades tornarem a atmosfera imprevisível, alguns ciclos quase-periódicos como El-Niño, que apresenta ciclos na atmosfera e no oceano com períodos de 2 a 5 anos, permitem sua previsão por meio de modelos empíricos baseados em análise de séries temporais ou por modelos de circulação geral (Vautard et al., 1992). O que levou a muitos estudos sobre periodicidades temporais e detalhamento de padrões de circulação atmosféricas com base em diferentes técnicas estatísticas como as funções empíricas ortogonais (Barnett & Preisendorfer, 1978; Mo & Ghil, 1987).

Ao aplicar a análise por cluster aos Componentes Principais permite trabalhar com dados com um grande número de variáveis, reduzindo ao máximo o volume total do número de variáveis iniciais, com perda mínima das informações, além de contornar as dificuldades inerentes as séries de dados (Braga et al., 2012; Hannachi et al., 2007).

Mo and Ghil (1988), Vautard (1990, 1988) utilizaram o algoritmo k-means clustering acoplado à PCs a fim de determinar os estados da atmosfera ou padrões de regimes de tempo quase estacionários através do comportamento temporal. Esta metodologia também foi aplicada em outros trabalhos: Kidson (2000) identifica os regimes de tempo para a região da Nova Zelândia, Santos et al. (2005) isola os regimes de tempo responsáveis pela variabilidade interanual que influencia no regime de precipitação durante o inverno em Portugal e Braga et al. (2012) distingue quatro (4) regiões com características próprias e distintas de precipitação no Estado do Rio Grande do Norte no Brasil.

Dispersão de poluentes atmosféricos

A Diretiva n.º 2008/50/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de maio de 2008, estabelece que poluente é: *“qualquer substância presente no ar ambiente que possa ter efeitos nocivos na saúde humana ou no ambiente na sua globalidade”*. A legislação brasileira, através da Resolução CONAMA 03/1990 define que o poluente atmosférico é: *“qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna e flora; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade”*.

A EPA (US Environmental Protection Agency) lista 187 poluentes atmosféricos perigosos por efeitos adversos ao meio ambiente e à saúde humana (EPA, n.d. a), cujas fontes podem ser de origem natural, como: erupções vulcânicas, poeiras transportadas pelo vento e sais marinhos e as emissões; ou de origem antrópica agricultura e processos industriais. O aumento da população e a tendência de concentração em cidades têm potencializado às emissões antropogênicas de poluentes provocando o agravamento das condições de qualidade do ar e os níveis de impacto associados. Soma-se ainda as

contribuições associadas à queima de combustíveis fósseis e óleos para a geração de energia, refino de componentes químicos e emissões por veículos automotores.

Para Anderson (1999, 2009) episódios envolvendo poluição atmosférica não possuem uma definição formal, entretanto, são associados às altas taxas de concentrações de poluentes com duração superior a vários dias ou semanas. A EPA aponta que a exposição a altas concentrações de poluentes atmosféricos por um dado período de tempo pode gerar riscos à saúde humana: com o desenvolvimento de câncer, danos aos sistemas reprodutor, imunológico, neurológico e respiratório, e, em alguns casos, a morte (EPA. n.d. b). Destacando possíveis efeitos ao meio ambiente, como a formação de chuva ácida, eutrofização, redução de visibilidade e contaminação de solos e aquíferos.

Registros de tais eventos datam por exemplo: da Idade Média no Cairo em 1165 e do século XIV em Londres (Gaffney & Marley, 2009). Nesta última, há relatos de poluição atmosférica espessa, cheiro de alcatrão e aumentos significativos da taxa de mortalidade desde 1813 especialmente durante o período de inverno, em locais de maior concentração industrial e de baixada (Met Office, 2015). Destaca-se também eventos como o de 1984 em que 200.000 pessoas foram expostas a uma nuvem de gás tóxica derivada da planta de fertilizantes de Bhopal na Índia. A baixa velocidade do vento e a alta pressão de vapor do isocianato de metilo (composto utilizado na produção do fertilizante) potencializaram a toxicidade da nuvem gasosa levando a morte de 6.000 pessoas (Kjellstrom et al., 2006). A concentração de poluentes em casos, como o do Grande Nevoeiro de 1952 em Londres (Fenger, 2009) que provocou a morte de mais de 4000 pessoas e de Donora na Pennsylvania (com 20 mortes) foram potencializadas por condições meteorológicas, em que a inversão de temperatura e ventos fracos mantiveram os poluentes próximos à superfície (Gaffney & Marley, 2009).

Wallace and Hobbs (2006) define que os casos de poluição severa ocorrem quanto as taxas de emissões ou de formação de compostos atmosféricos excedem significativamente a taxa com a qual são dispersos pela ação do vento e do transporte vertical ou por processos de remoção por reações químicas ou por deposição. Lisboa (2007) aponta que os gases e partículas são capazes de se acumular na atmosfera permanecendo por um grande período de tempo, dependendo das características do poluente. Ou seja, o padrão de dispersão e de transporte é influenciado por vários fatores associados à atmosfera, terreno e

elementos de aerodinâmica, de forma que o comportamento de uma pluma na atmosfera é um processo complexo.

Na dispersão, os poluentes são submetidos a fatores que podem resultar na sua transformação ou no seu transporte na atmosfera. Processos como diluição (mistura com o ar), além de reações químicas podem alterar as propriedades do componente original possibilitando a formação de novos compostos. Além disso, podem ser removidos de seu transporte médio por meio de deposição (EEA, 2008).

Certas características de uma região como: a cobertura do terreno, umidade do solo, presença de centros urbanos, proximidade com áreas lacustres e marítimas e topografia interligadas às condições meteorológicas influenciam diretamente na trajetória, na concentração, na produção e na remoção dos poluentes atmosféricos. de Araújo & Coelho (n.d.) destaca que as condições meteorológicas de uma determinada região desempenham um papel importante no transporte de poluentes entre a fonte e o receptor. Sendo um dos fatores que juntamente com a topografia, as reações químicas e/ou fotoquímicas e fenômenos de transporte influenciam na concentração espaço-tempo do poluente na atmosfera.

Uma vez que muitos poluentes possuem um padrão complexo de dispersão identificar o comportamento da pluma de dispersão de poluente, implica em conhecer as condições meteorológicas locais e o papel de suas variáveis (como pressão, precipitação e ventos). Varghese et al. (2011) destaca que os processos meteorológicos influem significativamente no transporte, produção e nos processos de remoção dos compostos na atmosfera.

Estudos de dispersão de emissões acidentais de CO₂ devido a ruptura do gasoduto de transporte derivado do processo de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS, em inglês) foram realizados por Koornneef et al. (2010, 2012), Gorenz et al. (2013), Liu et al. (2014), Herzog & Egbers (2013) e Woolley et al. (2014). Tendo sido demonstrado que os padrões de dispersão do CO₂ variam de acordo com as condições locais meteorológicas (especialmente, estabilidade e ventos) e de terreno.

Estudos de análise de consequências (efeitos físicos) e vulnerabilidade de Centrais Nucleares para hipóteses acidentais como vazamentos de produtos inflamáveis e tóxicos consideram além das características da liberação, como quantidade, duração e altura da

fonte de escape; as características meteorológicas da região, como velocidade do vento, pressão atmosférica, temperatura ambiente e umidade relativa do ar (ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A., 2007a).

Lisboa (2007) e Himmelman & Kawano (2000) enumeram algumas condições favoráveis à dispersão dos poluentes, tais como: chaminé alta, topografia plana, ventos e um gradiente instável de temperatura. Entretanto, condições meteorológicas adversas contribuem para a redução da qualidade do ar e episódios críticos de poluição (Moreira & Tirabassi, 2004).

Abdul-Wahab et al. (2014) demonstra que ao estudar emissões acidentais de H_2S em diferentes áreas com características meteorológicas próprias, os impactos na dispersão são diferentes. Yadav et al. (2014) e Hai & Oanh (2013) apontam que a poluição em uma certa região é dirigida por dois fatores: condições meteorológicas e as fontes de emissão, sendo que as tendências e variabilidade das concentrações dependem das características meteorológicas da região. Damilano et al. (2006) destaca que condições meteorológicas distintas com emissões semelhantes podem registrar concentrações de poluentes atmosféricas diferentes. Sendo o tempo de permanência influenciado por parâmetros como: regime dos ventos, a umidade do ar, a radiação solar, a temperatura, a estabilidade atmosférica.

Price et al. (2014) estuda os efeitos do tráfego e dos principais parâmetros meteorológicos na concentração de particulados. A precipitação atua na remoção das partículas reduzindo a concentração, efeito de limpeza da atmosfera (Janhäll et al., 2004; Deshmukh et al., 2013).

Paz et al. (2007) destaca que a evolução temporal e espacial da concentração de um poluente atmosférico pode ser verificada através da equação de conservação de massa, que envolve os processos de advecção, difusão, reações químicas, fontes e sorvedouros. Ao passo que o comportamento destes compostos pode ser resolvida numericamente através da aplicação de modelos numéricos de dispersão.

O gerenciamento de acidentes nucleares requer uma coordenação entre as equipes tanto em campo quanto nos centros de controle e demais agentes, possibilitando a análise da situação e repasse da correta informação sobre os perigos (Benamrane & Boustras, 2015). Tendo em vista que a meta inicial de fazer com que os sistemas voltem a funcionar

em segurança e mitigar a situação para a população e para o ambiente. Nesse cenário os modelos matemáticos possibilitam simular o comportamento da pluma de dispersão dos poluentes, e sua evolução ao longo do tempo tanto da trajetória quanto da concentração, dando uma resposta em tempo real para as tomadas de decisão (Winiarek et al., 2011).

Moreira & Tirabassi (2004) elenca que os modelos matemáticos permitem descrever e interpretar os dados experimentais; controlar em tempo real e/ou analisar a qualidade do ar; administrar as liberações acidentais e avaliar as áreas de risco; identificar as fontes poluidoras; administrar e planejar o território.

Em condições normais de operação das Centrais Nucleares mínimas quantidades de materiais radioativos são emitidas para a atmosfera, sendo dispersas pelo vento ou removidas através de processos de deposição. Turner (1994) aponta que a alteração da concentração na atmosfera dos gases radioativos emitidos em usinas nucleares decorre de processos como: decaimento radioativo e reações químicas provenientes; deposição úmida e seca; formação e coalescência de aerossóis; ressuspensão de material depositado na superfície.

Figueira & Cunha (1998) destaca que apesar de serem controladas e monitoradas, as emissões derivadas das centrais nucleares contribuem de forma significativa para o inventário dos radionuclídeos. Smith & Bewers (1993) apontam que a maior descarga de radionuclídeos antropogênicos nos oceanos ocorreu nas devido aos testes nucleares realizados nas décadas de 1950 e 1960. Dinis et al. (2014) aponta que o carvão utilizado pelas centrais termelétricas contém quantidades naturais de radionuclídeos em sua composição, como urânio, tório e potássio 40. Com a combustão do carvão, minerais e a maioria dos radionuclídeos não sofrem queima e ficam acumuladas nas cinzas leves e de fundo, sendo as primeiras são liberadas para o ambiente através das emissões contínuas.

Entretanto, em situações acidentais, as liberações de efluentes gasosos são significativas. Por este ter sido o maior acidente depois de Chernobyl, muitos estudos sobre a dispersão atmosférica e as consequências radiológicas das emissões acidentais de Fukushima foram realizados, voltados para os radionuclídeos (Korsakissok et al., 2013). Diversos grupos de pesquisadores testaram modelos de dispersão utilizando-os para indentificar um possível padrão de trajetória, de tomadas de decisão em situações de emergência em relação à saúde e proteção quanto à radiação. O caso de Fukushima, foi

significativo não só pela liberação de grandes quantidades de compostos radioativos para a atmosfera, como também para a compreensão da dispersão em uma escala local ou regional e o respectivo impacto governado pelas características da meteorologia regional, como: a circulação na baixa troposfera e o regime de precipitação local (Srinivas et al., 2012).

Ramanathan & Feng (2009) destaca a teleconecções em escala global o que permite um rápido transporte de poluentes na atmosfera. Segundo, Figueira & Cunha (1998) efluentes radioativos derivados de centrais nucleares atingem a troposfera e estratosfera sendo transportados e distribuídos globalmente pela circulação atmosfera por certo período de tempo. Tal situação é descrita por Momoshima et al.(2012), Lozano et al.(2011) e por Manolopoulou et al. (2011) em que diversos países detectaram radionuclídeos resultantes da emissão acidental de Fukushima, a mais de 1000 km a oeste da planta.

Assim, o padrão de dispersão de poluentes é complexo e influenciado pelas características meteorológicas de uma região, além de outros processos que ocorrem na atmosfera. Variações temporais, sazonais são reflexos desta influência que possibilitam o transporte dos poluentes para longas distâncias ou sua concentração. A curto prazo o aumento na concentração pode estar associada a liberações acidentais. Dessa forma, utilizar ferramentas que permitam identificar os principais processos que governam o transporte e a difusão dos poluentes, além dos regimes de tempo da região é importante.

Capítulo 4 – Metodologia

Para o estudo da trajetória da pluma de dispersão de poluentes atmosféricos, inicialmente foram obtidos os regimes de tempo a partir de dados de reanálises climáticas globais ERA-INTERIM disponibilizados pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), para um período de 30 anos, de 1985 a 2014, para a rodada das 12:00Z, com resolução de grade de 0.75 X 0.75. Os parâmetros considerados foram: pressão ao nível médio do mar, componentes u e v do vento a 10 metros e temperatura a 2 metros.

A fim de determinar os regimes de tempo predominantes foi utilizado o método de análise por clusters, cuja forma de execução das medições depende da aplicação (MathWorks, 2015a). Considerando que o objetivo é o de distinguir padrões, classificando os elementos do conjunto de dados a partir de seus atributos foi aplicado o modo de particionamento *k-Means Clustering* (Teknomo, n.d.).

Conforme destacado por Santos et al. (2005), a utilização da pressão ao nível médio do mar a fim de classificar os regimes de tempo apresenta mais vantagens se comparada a outras variáveis como o geopotencial, pela sua maior disponibilidade (em espaço e tempo) e confiabilidade, o que permite melhor representação das médias diárias pelos modelos além de possibilitar expandir a abordagem estatística para a mesma variável climática para áreas onde inexistem dados ou os mesmos não estão disponíveis.

Para tanto foi desenvolvido um programa em Matlab que considera uma matriz diária de pressões ao nível médio do mar cujos elementos variam conforme a latitude, a longitude e o tempo. A fim de analisarmos a variabilidade do campo de pressões foram calculadas as EOFs e PC para a matriz inicial, por meio de autovetores e valores próprios da matriz de covariância ponderada pela raiz quadrada do cosseno da latitude. Tal método é utilizado para obter padrões espaciais de variabilidade, variações temporais, além de determinar o grau de importância de cada padrão e vem sendo largamente empregado para os campos de pressão ao nível do mar e de temperatura da superfície do mar (Bjornsson, 2007).

Após a obtenção da primeira PC, aplicou-se o algoritmo K-means, que inicia a análise, para um número pré-definido K de clusters, movimentando os objetos entre os clusters de forma a minimizar a variância dentro dos clusters e maximizar a variância entre

cada cluster. Christiansen (2007) expõem que cada ponto é alocado em um cluster cujo centro é o mais próximo, enquanto o centro de cada cluster é recalculado como o centróide a partir dos pontos inseridos no grupo. Tal procedimento é repetido até que seja atingida a convergência. Para isso a função k-means utiliza um algoritmo que minimiza a soma das distâncias (calculadas pelo quadrado da distância euclidiana) de cada elemento até o centróide de todos os clusters até que esta soma não possa mais ser reduzida (MathWorks, 2015b).

Em resumo, os regimes de tempo são isolados pela análise dos clusters do algoritmo K-means em um subespaço gerado pelo subconjunto das EOFs/PC da pressão ao nível médio do mar, sendo então criada uma estrutura de classificação automática em que cada dia define um regime de tempo específico (Santos et al., 2005).

A figura 5 representa um esquema do processo de separação dos dados por clusters para uma matriz com 2 colunas em que a primeira coluna representa a latitude e a segunda a longitude. Para este caso, os dados foram separados em 2 grupos e o vetor identificador gerado dos clusters terá 5 posições (correspondente ao total de linhas) com o indicador do grupo (1 ou 2).

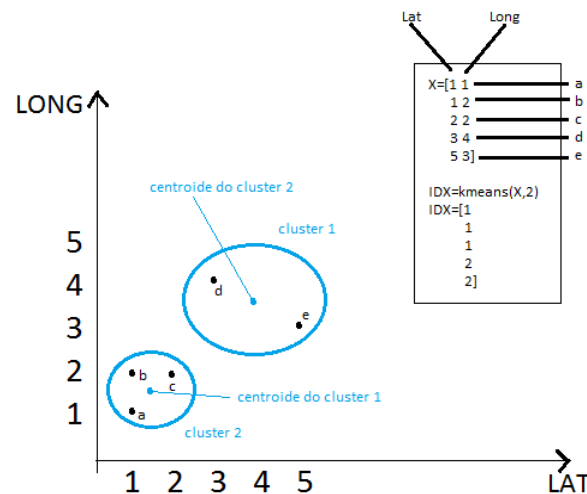


Figura 5 - Representação esquemática do processo de análise por clusters.

Inicialmente, para a obter os regimes de tempo foram consideradas as coordenadas de latitude: -5°N, -70°S e de longitude: -120°W, 0°E. Esta configuração permitiu identificar os principais sistemas atmosféricos de origens tropical e polar que influenciam as

condições de tempo da América do Sul, com destaque para os dois anticiclones quase-estacionários: do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS) (ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A., 2007b). Tais sistemas são de grande importância para a determinação do clima na América do Sul uma vez que influenciam também na atuação de outros sistemas como a penetração de massas de ar. Entretanto, estes limites iniciais mostraram-se não satisfatórios para identificar os regimes de tempo para uma área reduzida, como a que se localiza a Central Nuclear, uma vez que os regimes captados e agrupados pelos clusters influenciam toda a América do Sul. A fim de reduzir a influência de alguns sistemas e de fatores nos cálculos dos clusters foram utilizadas algumas configurações, sendo a que apresentou bons resultados a área cujas latitudes variam entre as latitudes: -10°N , -40°S e longitudes: -75°W , 0°E .

Para ambos conjuntos de coordenadas acima destacados foram realizadas análises com o algoritmo K-means com 4, 5 e 6 clusters. Os melhores resultados foram obtidos para a análise com 5 clusters, uma vez que captaram os principais sistemas de tempo de grande escala sobre a área de estudo. As figuras 7 a 11 e 13 a 17 do capítulo 5 representam os regimes de tempo para as análises com 5 clusters para as coordenadas da América do Sul e do Sudeste do Brasil.

A partir da determinação dos regimes de tempo é obtido um calendário de ocorrência para cada um destes regimes que será a base para a seleção dos episódios para a simulação das trajetórias da pluma. A tabela 1 apresentada os resultados para cada um dos regimes, com as respectivas percentagens de ocorrência no intervalo de 30 anos.

Para a escolha dos episódios de simulação de emissões, tendo como base a tabela 1, foi realizada uma primeira filtragem considerando os anos mais recentes de dados, ou seja, anos de 2013 e 2014. Outro aspecto relevado foram os diferentes tempos de resiliência para os poluentes na atmosfera. No caso de Fukushima, o radionuclídeo principal derivado dos vários processos de fissão é o iodo-131, cujo tempo de meia vida é de 8 dias; enquanto o cézio-137 possui meia vida de 30 dias, sendo facilmente carregado na atmosfera (World Nuclear Association, 2015a). Apesar deste trabalho não considerar os radionuclídeos emitidos especificamente pela CNAEA, optou-se por selecionar episódios onde houvesse a ocorrência mínima de 3 dias de cada regime de tempo (tabela 2).

Regimes de tempo (5 clusters)	Total de dias por regime de tempo entre 1985 e 2014	
1	3264	29,79%
2	1812	16,54%
3	1569	14,32%
4	2412	22,01%
5	1900	17,34%

Tabela 1 - Total de dias por regime de tempo entre 1985 e 2014.

Regimes de Tempo	Episódios por Regime			
	2013		2014	
	Total de dias	Episódios com duração superior a 3 dias	Total de dias	Episódios com duração superior a 3 dias
1	115	8	103	11
2	49	4	72	8
3	66	4	47	2
4	68	6	60	7
5	67	3	63	6

Tabela 2 – Total de episódios selecionados por regimes de tempo para os anos de 2013 e 2014.

Afim de escolher os episódios foi também utilizado o campo de ventos. Para cada regime de tempo foram obtidas as rosa dos ventos para o período entre 1985 e 2014

(figuras 19 a 23 e 24 a 28), além da distribuição temporal para os anos de 2013 e 2014 (figuras 29 a 38 e 39 a 48) para a CNAAA em Angra dos Reis (latitude: -23.009, longitude: -44,47) e para a cidade do Rio de Janeiro (latitude: -22.9 , longitude: -43.2) capital mais próxima da área da Usina Nuclear. Os gráficos foram obtidos através do WRPLOT View, versão 7.0.0. (Wind Rose Plots for Meteorological Data) distribuído pela Lakes Environmental Software.

Assim, avaliando os resultados das tabelas 1 e 2, os regimes de tempo (figuras 13 a 17) e os respectivos campos de ventos para o Rio e a Usina de Angra, definiu-se que os episódios a serem simulados pertenceriam aos dos regimes 1 e 3. Ressalta-se que as análises e resultados dos regimes de tempo e campos de ventos serão apresentados no próximo capítulo.

Para o regime de tempo 1 foi definido o episódio entre os dias 6 e 11 de janeiro de 2014. Enquanto o episódio escolhido para o regime de tempo 3 é o de 22 a 31 de julho de 2013, representou o sexto sistema frontal, dos seis que atuaram no Brasil durante o mês de julho de 2013, desenvolvido a partir de um centro de baixa pressão formado nas proximidades do litoral de São Paulo e do Rio de Janeiro (Inpe, 2013).

Com o objetivo de avaliar as condições meteorológicas durante os dois episódios foram representados os campos de: temperatura em superfície, pressão ao nível médio do mar, ventos (direção e magnitude) em superfície e perfil vertical de temperatura e de temperatura do ponto de orvalho (para a cidade do Rio de Janeiro e para a área da CNAAA) , utilizando a ferramenta de visualização gráfica de dados de saídas de modelos ou de observação interativa GrADS (Grid Analysis and Display System). O GrADS foi desenvolvido pela IGES/COLA, sob supervisão da NASA, o qual utiliza diversos formatos de dados como GRIB, NetCDF ou HDF-SDS (Scientific Data Sets) (Stoelinga, n.d.).

Após a definição dos episódios passou-se a escolha do cenário de simulação. De Araújo Ribeiro (n.d.) destaca que as emissões derivadas da operação regular de Centrais Nucleares são relativamente pequenas para alterar de forma significativa a composição atmosférica. Entretanto, em casos acidentais uma grande quantidade de materiais radioativos são liberados podendo causar graves consequências ao meio ambiente e a população. Assim, para a simulação da trajetória da pluma de poluentes foi escolhido um cenário acidental da Usina de Angra.

Shrivastava et al. (2015) e Huh et al. (2013) destacam que os modelos de dispersão são frequentemente utilizados para os estudos em centrais nucleares para observar a dispersão dos poluentes emitidos na operação normal ou em casos acidentais. Os modelos utilizam equações capazes de estimar a concentração e a evolução temporal e espacial da distribuição dos poluentes na atmosfera com base no princípio de conservação de massa, utilizando dados: meteorológicos e de superfície, taxas de emissão, diferentes mecanismos de transporte advectivo e turbulento, entre outros processos que ocorrem na atmosfera (Molnary, 2014).

Para as simulações da evolução temporal das liberações acidentais dos episódios selecionados foi utilizado o WRF/CHEM V3.5.1. Um modelo numérico de mesoescala de última geração desenvolvido através de uma parceria entre diversos órgãos de pesquisa e desenvolvimento, tais como: National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Center for Environmental Prediction (NCEP), Forecast Systems Laboratory (FSL) e Air Force Weather Agency (FAWA) (ICEA, n.d.).

O WRF é um modelo não-hidrostático que apresenta dois núcleos dinâmicos (ARW e NMM), duas coordenadas verticais (coordenadas de altura e de massa Eulerianas), além de oferecer diferentes opções de parametrizações físicas para representar processos atmosféricos (Jiang et al., 2008). Utiliza um sistema de variáveis de assimilação de dados tri-dimensional e uma estrutura de software que permite o paralelismo computacional. De forma que pode ser utilizado para estudar situações atmosféricas idealizadas quanto reais em um espectro amplo de aplicações em escalas horizontais que variam de milhares de quilômetros a poucos metros (Klemp, 2004; Jiang et al., 2008).

O processo de simulação com o WRF ocorre nas seguintes etapas: o WRF Preprocessing System (WPS) realiza o pré-processamento por meio de três subsistemas (geogrid, ungrib e metgrib) que prepara os dados de entrada para a simulação; na inicialização do WRF (programa real) onde os campos do WRF são interpolados verticalmente; execução do WRF (modelo propriamente dito); e o pós-processamento através do ARWpost, convertendo as saídas do modelo para formatos de input dos aplicativos gráficos (ICEA, n.d.).

O WRF possui ainda um módulo químico que permite o estudo regional da qualidade do ar chamado de WRF-chem. Esta parte trata dos processos de transporte (advectivo, difusivo e convectivo), deposições úmida e seca, transformações químicas, emissões, etc. (Jiang et al., 2008).

Simulações com traçadores passivos são úteis e computacionalmente eficientes para observar as emissões, transporte e mistura de produtos químicos. Ahmadov (2014) descreve que na opção de traçador passivo a parte química não é incluída na simulação sendo somente considerado o transporte de poluentes. Neste modo todos os traçadores são advectados e verticalmente misturados.

Foi definido, para ambos os episódios, um período de liberações de 48 horas (prazo para ações de resposta à emergência), para os domínios d01 e d02 no WRF, conforme indicado na figura 6.

WPS Domain Configuration

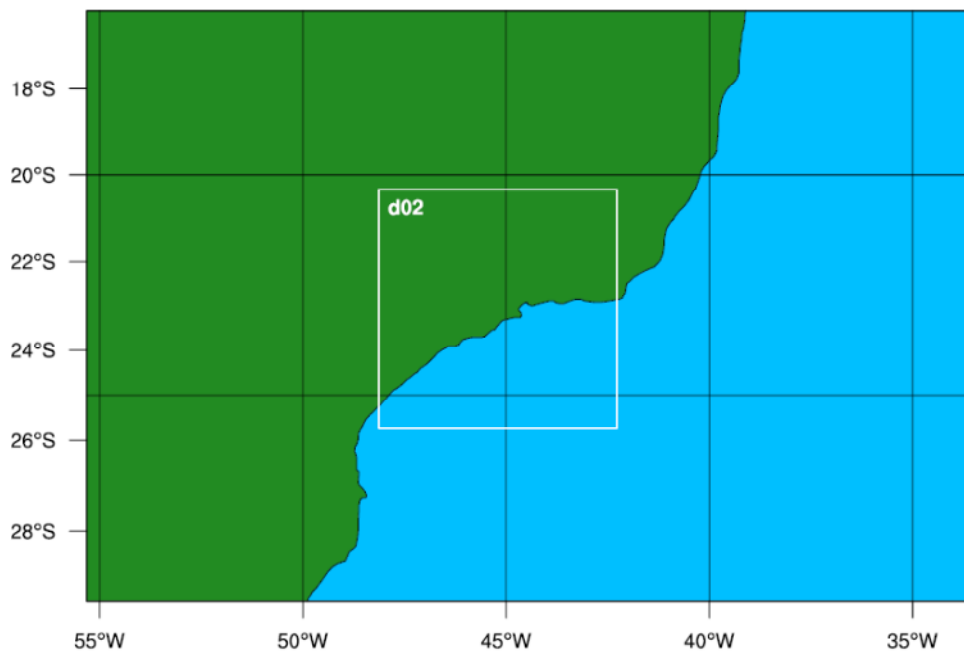


Figura 6 - Mapa dos domínios utilizados na simulação com o WRF.

Assim, no primeiro episódio, o período das simulações foi de 5 a 11 de janeiro de 2014, com as emissões iniciando no dia 6 e finalizando no dia 8. Ao passo que para o

evento do regime de tempo 3 a simulação foi realizada entre os dias 22 e 31 de julho de 2013, com as emissões entre 23 a 25. De forma a estudar os mecanismos e o grau de dispersão dos poluentes optou-se por considerar o poluente emitido como um traçador passivo uma vez que não influencia o escoamento e permite que seja observado somente o transporte. Em ambos os episódios, a emissão passiva limitou-se aos 3 primeiros níveis eta (180m), com o decaimento linear a fim de evitar instabilidades numéricas sendo mantido um perfil temporal constante, com taxa de emissão de $10000 \text{ mol km}^{-2}\text{hr}^{-1}$.

Para representar as trajetórias de dispersão dentro e fora da camada limite atmosférica optou-se pelo domínio 02, cuja grade varia entre -25.72 e -20.35, -48.12 e -42.28 para os períodos de 06 a 09 (episódio 1) e de 22 a 27 (episódio 2). Assim, para a Camada Limite Atmosférica (CLA) foram integrados os 8 primeiros níveis eta a partir da superfície, cuja altura seria de aproximadamente 1100 m. E por conseguinte para fora da CLA, foram integrados os demais níveis eta, de 9 a 39. De forma a melhor avaliar as trajetórias obtidas, foram gerados os campos da evolução temporal dos ventos em superfície, a partir de dados do ERA-INTERIM para os horários de 00:00Z, 06:00Z, 12:00Z e 18:00Z para os dois episódios estudados.

Capítulo 5 - Resultados e Discussão

O sistema climático, a química e os movimentos na atmosfera terrestre são induzidos pela repartição desigual da radiação solar (Ramanathan & Feng, 2009). A distribuição assimétrica de oceanos e continentes, além das características topográficas sobre os continentes também influenciam nos movimentos atmosféricos. Os padrões observados de circulação possibilitam a redistribuição de calor, de umidade e de momentum (quantidade de movimento) por todo o globo mas, não de forma homogênea, o que contribui, por vezes, para a redução das variações regionais dos elementos climáticos, como temperatura e precipitação (INPE, 1986). Os processos de trocas de energia e de umidade pela interação entre os oceanos e a atmosfera afetam o padrão das condições climáticas globais e regionais, além de gerar os fenômenos que ocorrem na troposfera.

As variações sazonais na radiação solar controlam a circulação atmosférica e a dinâmica de distribuição dos centros de alta e de baixas pressões. Os estados médios persistentes da atmosfera, que incluem os padrões de grande escala, podem ser observados através dos regimes de tempo, uma vez que permitem representar uma configuração do tempo meteorológico que permanecem por um determinado período de tempo (EUMETCAL, n.d.).

Dessa forma, os regimes de tempo podem ser utilizados como uma ferramenta para analisar a recorrência e persistência de padrões de fluxos associados à dinâmica de grande escala ou planetária, por um certo período de tempo sobre uma certa região geográfica, bem como observar as relações entre a circulação de grande escala e as características locais. Inicialmente, a observação da persistência e da recorrência dos padrões de grande escala através da identificação dos regimes de tempo abrangeu uma área correspondente ao continente Sul-americano, sendo posteriormente reduzida, a fim de avaliar as condições atmosféricas regionais da área do Complexo Nuclear de Angra dos Reis. Os regimes de tempo para o primeiro cenário são apresentados a seguir.

Regimes de Tempo- América do Sul

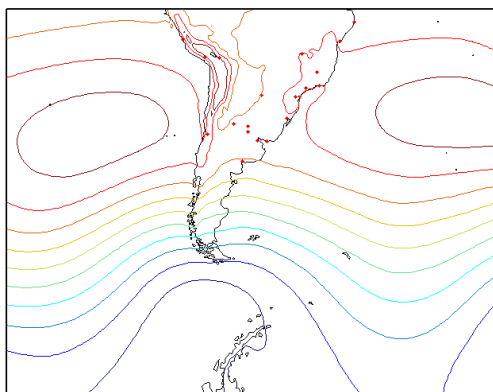


Figura 7 - Continente Sul-americano – Regime de tempo
1

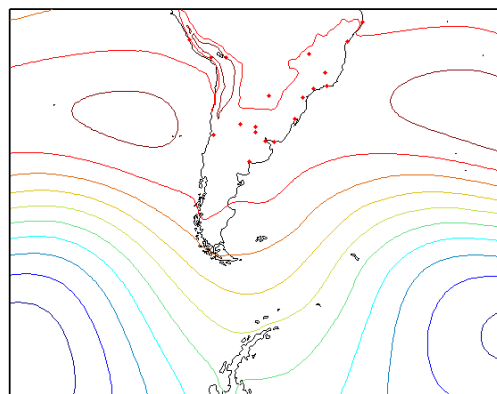


Figura 8 - Continente Sul-americano – Regime de
tempo 2

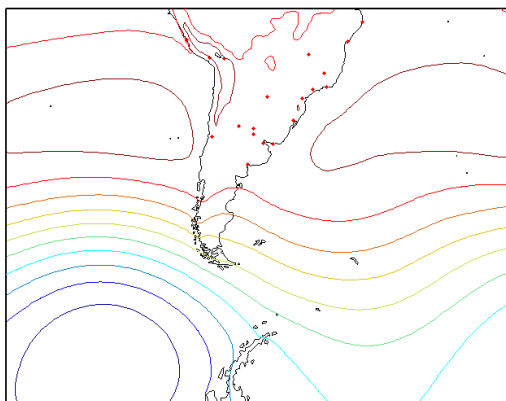


Figura 9 - Continente Sul-americano – Regime de tempo
3

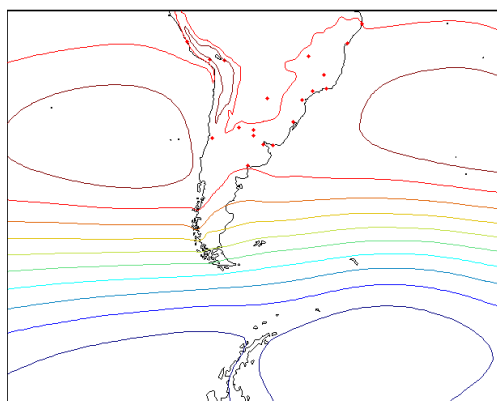


Figura 10 - Continente Sul-americano – Regime
de tempo 4

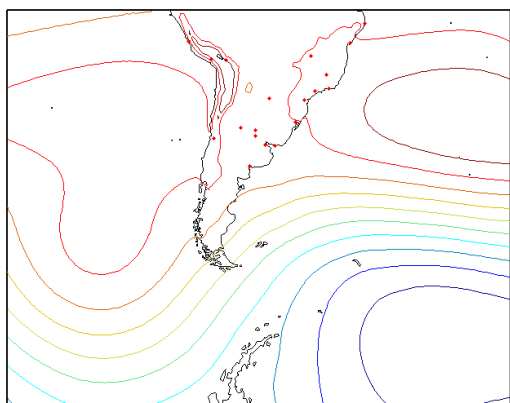


Figura 11 - Continente Sul-americano - Regime
de tempo 5

O continente Sul-americano localiza-se entre as latitudes 12°N e 55°S. Apresenta uma geografia diversificada com destaque para: a Cordilheira dos Andes que se estende de norte a sul na costa oeste, planícies compostas por grandes superfícies aquáticas (como as dos rios Amazonas e Orinoco), a floresta equatorial Amazônica e o deserto do Atacama ao norte do Chile. Tais características influenciam na atuação e no desenvolvimento dos sistemas atmosféricos (Bibliográfica, 2010). A circulação atmosférica e os padrões de tempo do continente sul-americano são influenciados diretamente pelas condições termodinâmicas sobre os oceanos Pacífico e Atlântico. Nas figuras 7 a 11 observa-se que os padrões de escoamento na baixa troposfera sobre o continente e os oceanos refletem a atuação de dois principais sistemas de circulação atmosféricos quase-estacionários: Anticiclone de Santa Helena ou Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) – sobre o oceano Atlântico Sul; Anticiclone da Ilha de Páscoa ou Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul – sobre o Pacífico Sul; e Anticiclone de Mascarenhas – sobre o oceano Índico (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007). O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e o Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul controlam, em grande parte, as condições de tempo sobre o continente sul-americano, uma vez que têm influência em outros processos atmosféricos (ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A., 2007b). Bem como o escoamento dos sistemas transientes migratórios que afetam as condições de tempo locais, tais como frentes.

Outro sistema atuante no continente é a Baixa do Chaco, um centro de baixas pressões, localizado sobre a região do Chaco no Paraguai (em torno de 17°S e 65°W), de origem térmica formado pelo aumento de temperatura sobre o continente e oceano durante o verão. Nestas condições, em baixos níveis, ocorre a convergência do ar quente e úmido dos anticiclones vizinhos e liberação de calor latente em altos níveis derivada da convecção em seu interior. No inverno, devido à redução da temperatura este cenário não se repete. A presença da Baixa do Chaco associada a circulação ASAS, no verão, induzem a formação de uma faixa de convergência no interior do continente, com o transporte de umidade em baixos níveis pelos ventos Alíseos.

Os anticiclones subtropicais semi-permanentes são sistemas de alta pressão em torno dos 30° de latitude sobre os oceanos e estão associados à circulação média meridional da atmosfera devido às células de Hadley (Bastos & Ferreira, 2000). No Hemisfério Sul os anticiclones desempenham papel fundamental nas condições de tempo e no clima da

América do Sul, África e da Austrália, favorecendo ainda a formação de desertos. Sobre o continente sul-americano destaca-se a influência do ASAS e o ASPS, cuja variação em sua posição central e abrangência espacial podem ser visualizadas nos regimes de tempo (figuras 7 a 11).

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) atua sobre o leste do continente sulamericano durante todo o ano apresentando uma circulação com ventos predominantes de quadrante norte. Tal sistema apresenta duas características marcantes: devido a radiação solar, a região central registra altas temperaturas (principalmente no verão) e altas taxas de umidade absoluta pela evaporação sobre a sobre o oceano Atlântico.

O Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) atua à oeste da América do Sul e apresenta as mesmas características do ASAS, entretanto sua atuação sobre do continente em baixos e médios níveis é menos expressiva. Isso ocorre pela restrição imposta à circulação pela Cordilheira dos Andes que impede a passagem do ar quente e úmido para o interior do continente, gerando um fluxo de escoamento de ar frio de direção sul-norte e de ar quente de norte para sul.

A sazonalidade altera as características dos anticiclones conforme destacado por Vianello e Alves (1991). A variação do gradiente de temperatura continente/oceano provoca a migração e gradação da intensidade destes centros. Assim, a persistência na atuação e o posicionamento destes dois anticiclones durante todo o ano afetam os padrões de circulação sobre a América do Sul. O ASPS e o ASAS podem bloquear a atuação de anticiclones migratórios na retaguarda dos sistemas frontais, impedindo o seu deslocamento para as mais baixas latitudes desviando-os para leste. Tal situação é observada nos regimes 3 e 4 (figura 9 e 10), onde o deslocamento dos anticiclones para o norte e para o interior do continente (no caso do ASAS) gera um fluxo quase zonal ao sul, o que impede a passagem e atuação de sistemas transientes a leste do continente.

Na costa ocidental (esquerda do continente) observa-se a influência da Cordilheira dos Andes, uma vasta cadeia montanhosa com aproximadamente oito mil quilômetros de extensão, cuja altitude média é de 4000 m e seu ponto culminante, o monte Aconcágua, possui 6962m de altitude. Tais características formam uma barreira a atuação do ASPS e dos sistemas transientes, além de controlar a distribuição das massas de ar impedindo sua entrada para o interior do continente.

As condições do tempo local são controladas também por perturbações transientes, como frentes, as linhas de instabilidade e os anticiclones migratórios, cujas características se alteram ao serem transportadas pela circulação dominante (de grande escala). Os anticiclones migratórios, por exemplo, podem seguir trajetórias na direção do lado Pacífico ou Atlântico do continente, sendo influenciados respectivamente pela Cordilheira dos Andes e pela Baixa do Chaco. Tais perturbações serão abordadas posteriormente, uma vez que influenciam diretamente sobre a região do Complexo de Angra dos Reis.

Ao sul do continente, na faixa subpolar de convergência de baixas pressões, nota-se em todos os regimes de tempo (figuras 7 a 11) a presença do ciclone (depressão) extratropical polar sobre o mar de Weddell, a leste da península Antártica. Este se origina devido ao intenso gradiente térmico na região costeira à Antártida e possui um deslocamento, em geral, de oeste para leste modulado pelos Anticiclones semi-permanentes.

A dinâmica atmosférica na região norte do continente sul-americano é influenciada pela presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que se configura por ser um divisor entre as células de circulação de Hadley próximas do Equador em ambos os hemisférios. O entorno da linha do Equador é caracterizado pela significativa nebulosidade e pluviosidade associadas aos processos evaporativos e de convecção (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007). Sazonalmente, a ZCIT se desloca seguindo a ação do movimento aparente do sol, sendo dependente diretamente do aquecimento da superfície. Durante o inverno no hemisfério Sul, a ZCIT desloca-se para norte, fazendo com que a ASAS também se desloque para norte e para o interior do continente (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

Os eventos de El Niño e de La Niña são caracterizados por serem uma alteração do sistema oceano-atmosfera no Oceano Pacífico tropical, que afetam as condições de circulação de grande escala da atmosfera, em baixos e altos níveis, na América do Sul, como em outras partes do globo. Sob a ação do El Niño observam-se: aquecimento anômalo de temperatura das águas do Pacífico Leste, anomalia da pressão na parte leste (mais baixa) e oeste (mais alta) do oceano Pacífico, enfraquecimento dos ventos alíseos e alteração no padrão da célula de Walker (bipartida) que gera uma descendência do ar sobre a Amazônia e nordeste do Brasil inibindo a formação de nuvens. Assim, os principais efeitos do El Niño residem nas alterações de padrões de transporte de umidade,

provocando variações na distribuição das chuvas em regiões tropicais e de latitudes médias e altas (INPE, n.d.).

Em situações de La Niña verifica-se um resfriamento anômalo das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial Central e Oriental, além da intensificação (acima da média climatológica) dos aliseos. Quanto à pressão atmosférica, observa-se um aumento da mesma no Pacífico Central e Oriental em comparação ao Pacífico Ocidental.

As regiões do Brasil são afetadas de formas diferentes pelo El Niño e La Niña, sendo observada uma maior influência dos eventos de La Niña na precipitação no extremo Norte e do extremo Sul. Grimm e Ferraz (1998) destacam que a variabilidade espacial dos efeitos dos eventos La Niña é maior em relação ao El Niño, não havendo coerência das anomalias durante estes eventos em grandes áreas da Região Sudeste, principalmente por esta região ter um caráter de transição. Entretanto, o sudeste registra um moderado aumento da temperatura média, não havendo certeza em relação ao padrão de chuvas.

O conjunto de sistemas de grande escala destacados acima afetam de alguma forma as características atmosféricas da América do Sul. Ao avaliarmos os padrões de grande escala para a região tropical, onde se localiza a CNAAA (figura 12), constata-se que nem todos atuam diretamente a área de estudo. Assim, foi realizado um segundo ensaio dos regimes de tempo, com redução da área de abrangência, de forma a verificar os sistemas que influenciam diretamente nas condições de tempo da região de Angra.

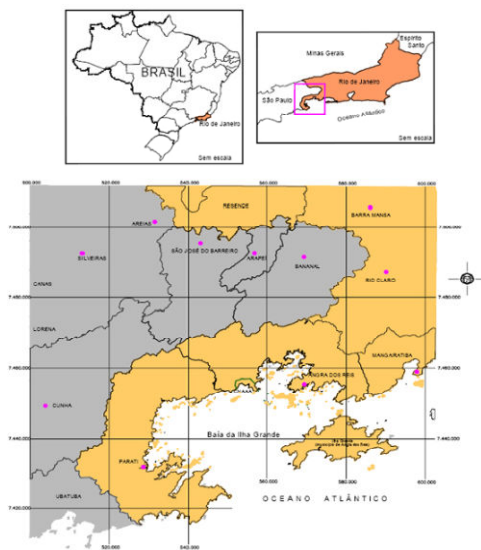


Figura 12 - Localização da CNAAA. Fonte: Relatório de Impacto Ambiental – RIMA da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto

Regimes de Tempo- Região Sudeste

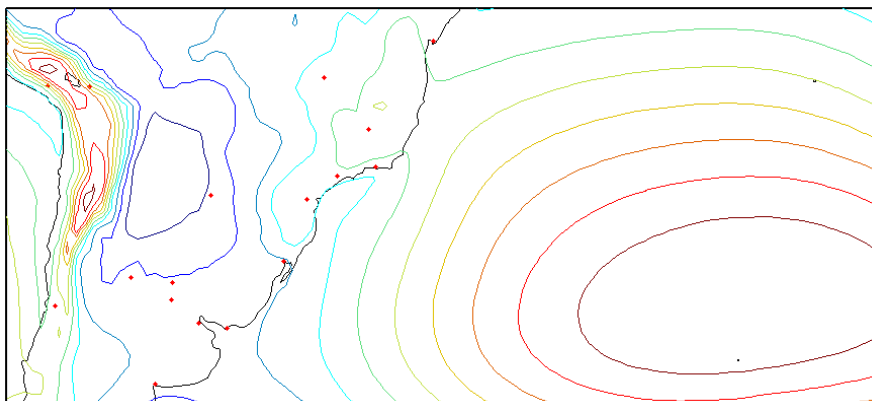


Figura 13 - Regime de tempo 1 - Região sudeste do Brasil

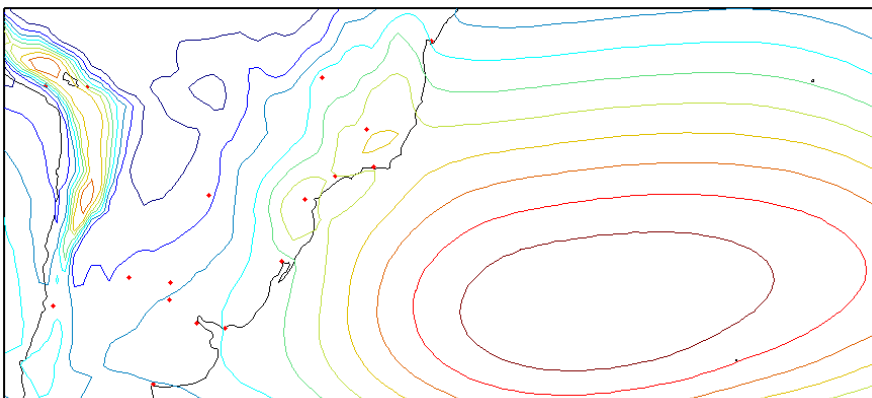


Figura 14 - Regime de tempo 2 - Região sudeste do Brasil

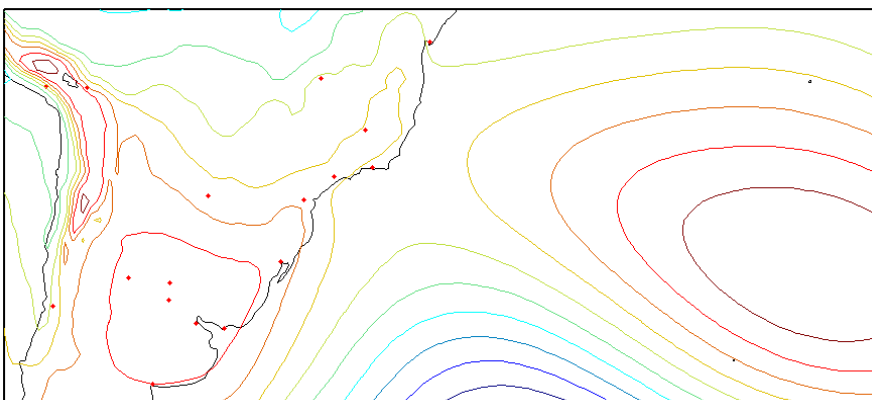


Figura 15 - Regime de tempo 3 - Região sudeste do Brasil

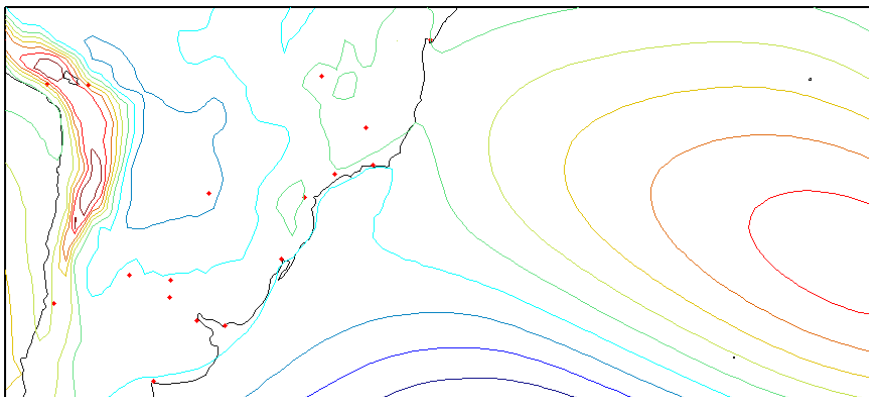


Figura 16 - Regime de tempo 4 - Região sudeste do Brasil

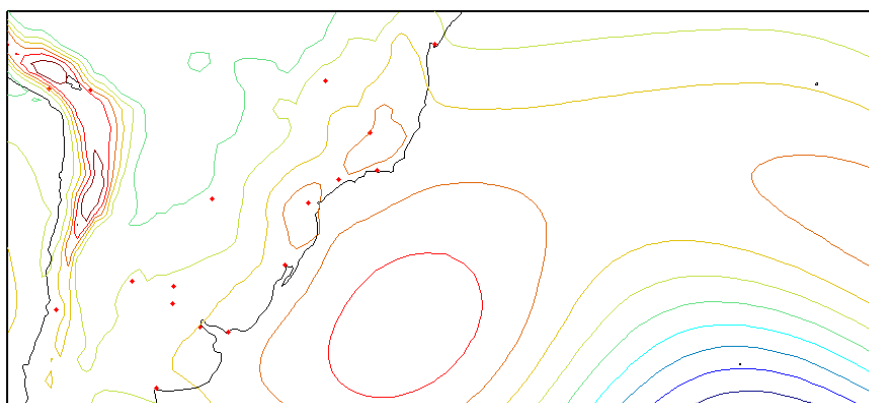


Figura 17 - Regime de tempo 5 - Região sudeste do Brasil

De acordo com Nimer (1979) e Barbieri (2005) a localização latitudinal da região sudeste do Brasil a caracteriza como uma zona de transição entre os climas quentes de latitudes baixas e os climas mesotérmicos do tipo temperado das latitudes médias. A análise dos regimes de tempo predominantes para o período de 1985 a 2014 para a região sudeste do Brasil mostrou que as condições de tempo são afetadas pelos seguintes sistemas de grande escala: Anticiclone do Atlântico Sul (regimes de tempo 1 e 2 com 46,33% dos eventos) e sistemas transitórios: frentes (regimes 3 e 4 com 36,33% dos eventos) e anticiclone migratório (regime 5 com 17,34%).

Para fins de comparação, os regimes de tempo não apresentam diferenças signifocativas sazonalmente. Durante o verão (figuras não mostradas) verificou-se a seguinte distribuição percentual: Anticiclone do Atlântico Sul (regimes de tempo 1 e 2 com 36,58% dos eventos), sistemas transitórios: frentes (regimes de tempo 3 e 4 com 30,12% dos eventos) e o anticiclone migratório (regime de tempo 5 com 19,02%). Enquanto no inverno (maio a outubro): Anticiclone do Atlântico Sul (regimes de tempo 1

e 2 com 38% dos eventos), sistemas transitórios: frentes (regimes de tempo 3 e 4 com 30,72% dos eventos) e o anticiclone migratório (regime de tempo 5 com 17,56%).

Conforme destacado anteriormente foram realizadas análises para identificação dos regimes de tempo pelo método K-means com 4, 5 e 6 clusters. Para 4 clusters, os resultados obtidos não representaram o regime de tempo 5 (figura 17) que representa a atuação do anticiclone migratório. Os cenários obtidos para 4 clusters indicam a ação do ASAS e dos sistemas frontais (ao sul e sobre a região do Rio de Janeiro). Enquanto as análises com 6 clusters representaram os três principais sistemas acima mencionados com pequenas variações espaciais e percentuais. Assim, a análise com 5 clusters foi a que apresentou melhores resultados ao representar os regimes de tempo para o caso em estudo.

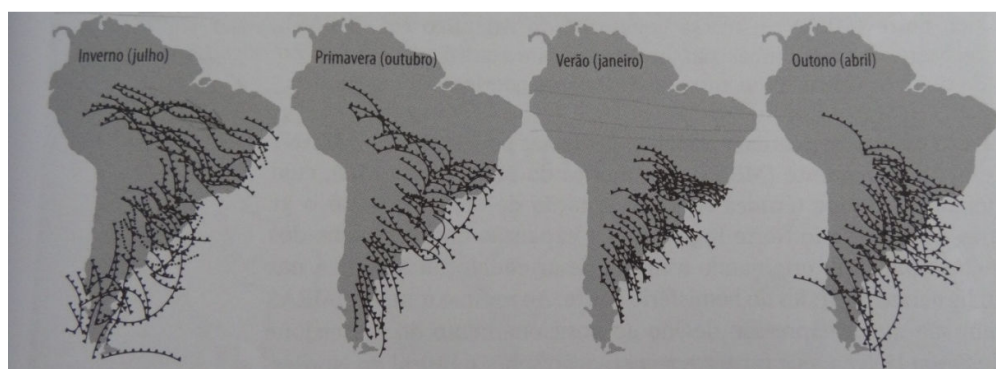
Nos regimes 1 e 2 (figuras 13 e 14) verifica-se que o ramo oeste do Anticiclone do Atlântico Sul atua diretamente sobre o sudeste brasileiro tanto durante o verão quanto no inverno. A dinâmica desse sistema também favorece a formação de nevoeiros e geadas na região e no sul do Brasil. Por outro lado, no verão o transporte de umidade ocorre, nos baixos níveis troposféricos, ao longo da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Bastos & Ferreira, 2000). Durante o inverno, há um aumento do gradiente de térmico com maiores temperaturas sobre o continente, o que faz com que o anticiclone se desloque para o interior inibindo a passagem de sistemas frontais, o que causa inversão térmica e aumento na concentração de poluentes nos principais centros urbanos das regiões sudeste e sul.

Em superfície, ocorre divergência do ar a partir do núcleo do ASAS devido à subsidência em altitude o que impede a formação de nuvens. Sob os oceanos podem ser observadas nuvens baixas. As condições de tempo observadas são de bom tempo, principalmente pela penetração do anticiclone. Devido a circulação anti-horária do ASAS registra-se a predominância de ventos de leste e de nordeste, conforme se observa nas tabelas 6 e 7 tanto para a cidade do Rio quanto para a área da CNAAA durante um período de 30 anos (figuras 19,20, 24 e 25).

Os regimes de tempo 1 e 2 (figuras 13 e 14) indicam também a influência de bloqueios no escoamento atmosférico nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, principalmente durante o outono. Nestes casos, ocorrem períodos relativamente longos de seca ou de chuva (Barbieri, 2005).

Na região tropical, verifica-se a presença dos sistemas semi-permanentes: ASAS sobre o Atlântico e da Baixa do Chaco (regimes de tempo 1, 2 e 4) sobre o continente. A oscilação sazonal da posição destes sistemas varia leste-oeste de acordo com a variação barotrópica anual dada pela diferença radiativa entre o continente e o oceano. Estes sistemas dominantes são responsáveis pela alteração e deslocamento dos sistemas transientes observados nos regimes de tempo 3, 4 e 5 (figuras 15, 16 e 17).

Nos regimes de tempo 3 e 4 (figuras 15 e 16) verifica-se a influência dos sistemas frontais. Predominantes nas latitudes médias, as frentes originam-se do deslocamento das massas polares para as baixas latitudes. O início da estação chuvosa no Sudeste está correlacionado com a passagem de frentes frias, cuja intensidade depende da dimensão temporal e espacial. Durante o inverno e primavera, o resfriamento do continente e o fortalecimento dos anticiclones polares fazem com que as frentes frias acarretem chuvas significativas sobre o Sudeste, enquanto no verão e outono há um decaimento na intensidade (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007). As variações espaciais da ocorrência de frentes frias e quentes na América do Sul, ao longo do ano, são mostradas a seguir.



*Figura 18 - Variações espaciais da ocorrência de frentes frias e quentes na América do Sul ao longo do ano.
Fonte: (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).*

Na figura 18 nota-se que muitos dos sistemas frontais não atingem a região sudeste, sendo desviados para uma trajetória sobre o oceano afastada do continente. Esse deslocamento é influenciado pelo escoamento dos sistemas de grande escala. Kousky & Cavalcanti (1984) e Barbieri (2005) destacam que o comportamento dos sistemas frontais é modulado pelo posicionamento do jato subtropical da América do Sul. Sendo este também responsável, em alguns casos, pelo desenvolvimento ou intensificação de sistemas convectivos que estejam sobre o sul e o sudeste do Brasil. Satyamurty & Mattos (1989)

apontam ainda que estas são regiões frontogenéticas em que as frentes podem se formar ou intensificar.

É importante destacar que o processos de ciclogênese na América do Sul são mais frequentes nas latitudes médias, entre 35° e 55°S sobre o oceano no verão e sobre o continente no inverno. As baixas quentes em superfície da região do Chaco paraguaio tendem a se tornar sistemas ciclônicos que se movem para leste, enquanto os ciclones extratropicais apresentam uma trajetória média para leste e sudeste (USP, n.d. a). A ciclogênese, na maioria dos casos, influencia no alinhamento das frentes frias (outono-inverno) ou na interação com sistemas convectivos (primavera-verão).

Outro sistema de escala sinótica que atua na região sudeste alterando o regime de precipitação é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). É geralmente definida como sendo uma faixa de nebulosidade persistente orientada no sentido noroeste-sudeste e que se estende desde o sul da Amazônia até o Atlântico Sul-Central. A ZCAS se desenvolve a partir do aumento de temperatura e de umidade oriundos do encontro de massas de ar quentes e úmidas provenientes da Amazônia e do Atlântico Sul (Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

A importância deste sistema está na transferência de calor, momento e umidade dos trópicos para as latitudes mais altas. Em baixos níveis gera instabilidade convectiva por processos advectivos. A confluência em baixos níveis que ocorre em condições de ZCAS pode estar associada aos Andes, influenciando na posição e no confinamento do campo de baixa pressão em baixos níveis (Baixa do Chaco) em função da liberação de calor latente na Amazônia/Brasil Central (USP, n.d.b).

Pelas características e configuração em grande escala da ZCAS, pode-se dizer que este sistema esteja incluso nos regimes de tempo 3 e 4 (figura 15 e 16). Entretanto, para fins de previsão a ZCAS, em geral, somente é reconhecida pela persistência de pelo menos 4 dias, caso contrário, o evento é caracterizado como Zona de Convergência de Umidade (ZCOU).

O Regime de tempo 5 (figura 17) representa a situação onde a região sudeste encontra-se sob a ação do anticiclone polar migratório (AMP). Formado no extremo sul da América do Sul devido ao acúmulo de ar polar proveniente dos turbilhões polares sobre o oceano, o AMP constitui-se numa massa de ar que frequentemente entra no continente. Ao

se deslocar o anticlone adquire as características das regiões por onde passa, assim inicialmente é muito estável com ar frio e seco, tornando-se instável conforme se desloca na direção do equador captando calor e umidade da superfície do mar. Assim, sua trajetória predominante é sudoeste para nordeste, entrando pelo continente entre os dois anticiclones ASAS e ASPS na retaguarda dos sistemas frontais.

Além dos sistemas supracitados, atuam sobre o sudeste: os complexos convectivos de mesoescala e as linhas de instabilidade. Satyamurty et al. (1998) pontua que os CCMs se desenvolvem na porção central da América do Sul, a leste dos Andes. Sendo de acordo com Barbieri (2005) associados aos sistemas frontais. Destaca-se que as linhas de instabilidade podem promover a ascensão do ar quente que gera chuvas, trovoadas e, por vezes, tempestades locais severas. Sobre o sudeste podem provocar precipitações fortes. São intensificadas ao atravessarem locais, como extensas massas de água e florestas, que forneçam vapor d'água.

Estudo da dispersão de poluentes para os regimes de tempo

Os regimes de ventos exercem um papel fundamental no transporte de poluentes, uma vez que definem a direção para qual as partículas serão carregadas. Além disso, afetam a taxa de concentração do poluente determinando a extensão da área geográfica coberta pela pluma. Os principais parâmetros meteorológicos a serem observados são: vento, temperatura, radiação solar, umidade do ar a opacidade, a estabilidade atmosférica, a altura da camada de mistura e a ocorrência de chuvas.

Destaca-se que a intensidade e direção dos ventos são modulados pelas condições meteorológicas e geográficas do terreno. Por exemplo, em centros urbanos, devido às diversas construções, a velocidade e direção do vento são alteradas afetando a dispersão, a diluição e a concentração dos poluentes.

A velocidade do vento pode contribuir na dispersão através da mistura do poluente com o ar, principalmente no momento inicial de saída dos gases das chaminé. É responsável por gerar turbulência mecânica, através do cisalhamento do vento ou por “bloqueios” que impedem o escoamento do fluxo de ar (de Araújo Ribeiro & Coelho, n.d.).

Em casos de calmaria, a dispersão é mais lenta levando a um aumento na concentração dos poluentes. Ventos moderados favorecem a sua dispersão, enquanto ventos fortes podem provocar um efeito de penacho e poluição localizada na direção dos ventos dominantes.

As tabelas 3 e 4 representam as distribuições de frequências de velocidades dos ventos para cada um dos regimes de tempo considerando o período de 1985 a 2014. Os resultados apontam que apesar das calmarias não ultrapassarem 1,8% considerando todos os regimes de tempo, estes são casos em que a dispersão é prejudicada e a concentração pode ser intensificada. As maiores frequências são de ventos fracos a moderados que favorecem a dispersão, enquanto, ventos fortes podem provocar um efeito de penacho e poluição fica concentrada na direção dos ventos dominantes. Além disso, os ventos mais intensos são registrados no regime de tempo 3, na CNAAA e no Rio, sob a influência dos sistemas frontais.

Distribuição das velocidades dos ventos por regime de tempo (%) para a CNAAA							
Regime de tempo	Calmaria	0,5 – 2,1	2,1 - 3,6	3,6 – 5,7	5,7 – 8,8	8,8 – 11,1	Acima de 11 ms⁻¹
1	1,5	24,4	37,7	31,5	5	0,1	0
2	1,1	20,7	34,0	34,4	9,5	0,2	0
3	0,4	14,1	28,8	36,6	17,2	2,4	0,4
4	1,3	26,4	40,4	25,8	5,8	0,2	0
5	1,4	17,9	31,0	36,2	13,2	0,4	0

Tabela 3 - Distribuição das velocidades dos ventos por regime de tempo (%) para a CNAAA entre 1985 e 2014.

Distribuição das velocidades dos ventos por regime de tempo (%) para o Rio de Janeiro							
Regime de tempo	Calmaria	0,5 – 2,1	2,1 - 3,6	3,6 – 5,7	5,7 – 8,8	8,8 – 11,1	Acima de 11 ms ⁻¹
1	1,2	34,0	51,7	12,7	0,3	0	0
2	1,0	30,	49,5	19,4	0,1	0	0
3	0,8	38,4	48,1	11,9	0,8	0,1	0
4	1,5	46,9	44,1	7,1	0,3	0	1,4
5	1,8	4,04	46,8	10,6	0,4	0	0

Tabela 4 - Distribuição das velocidades dos ventos por regime de tempo (%) para o Rio de Janeiro entre 1985 e 2014.

Velocidade média por regime de tempo (m s ⁻¹)		
Regime de Tempo	CNAAA	Rio de Janeiro
1	3,11	2,44
2	3,42	2,63
3	4,15	2,41
4	3,02	2,17
5	3,65	2,29

Tabela 5 - Velocidade média dos ventos por regime de tempo (m s⁻¹) entre 1985 e 2014.

Os padrões de distribuição das direções dos ventos para cada um dos regimes de tempo para o período entre 1985 a 2014 para a área da CNAAA e para a cidade do Rio de Janeiro são representados a seguir através das rosas dos ventos. As cores nos gráficos indicam a velocidade dos ventos (m s⁻¹).

Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA)

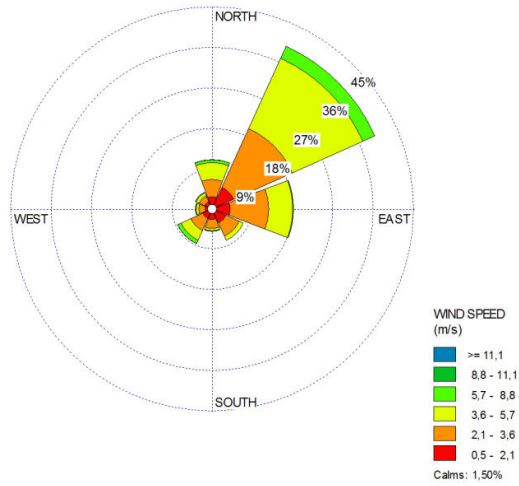


Figura 19 - Rosa dos ventos - CNAAA – Regime de Tempo 1

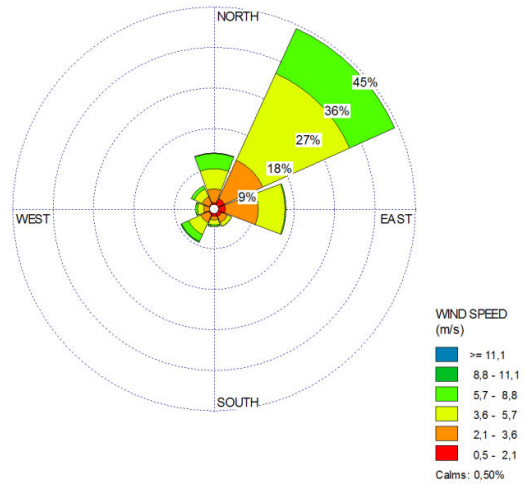


Figura 20 - Rosa dos ventos - CNAAA – Regime de Tempo 2

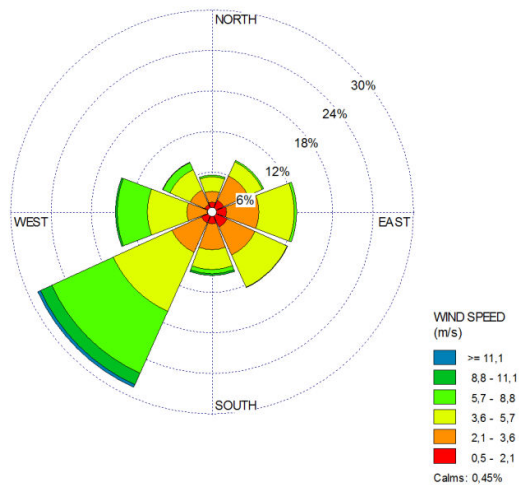


Figura 21 - Rosa dos ventos -CNAAA – Regime de Tempo 3

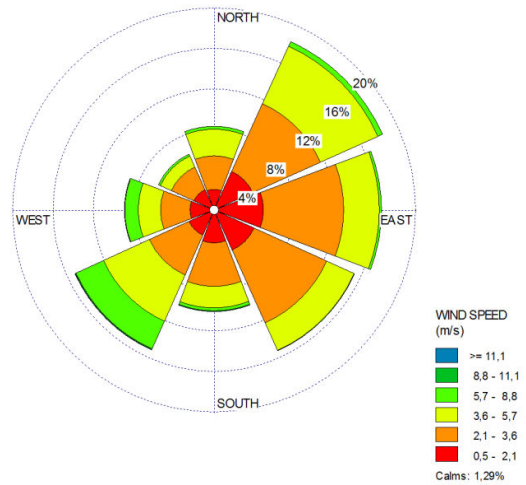


Figura 22 - Rosa dos ventos -CNAAA – Regime de Tempo 4

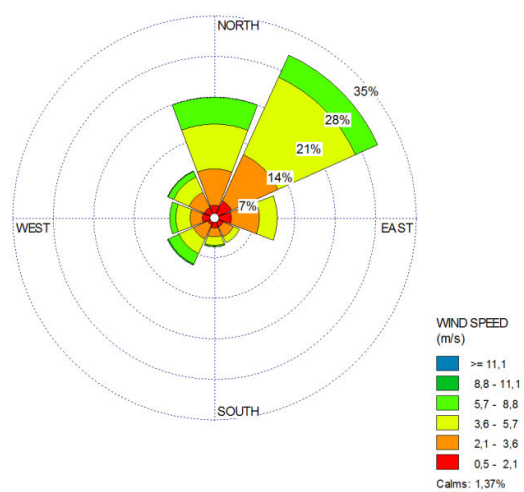


Figura 23 - Rosa dos ventos - CNAAB – Regime de Tempo 5

Rio de Janeiro

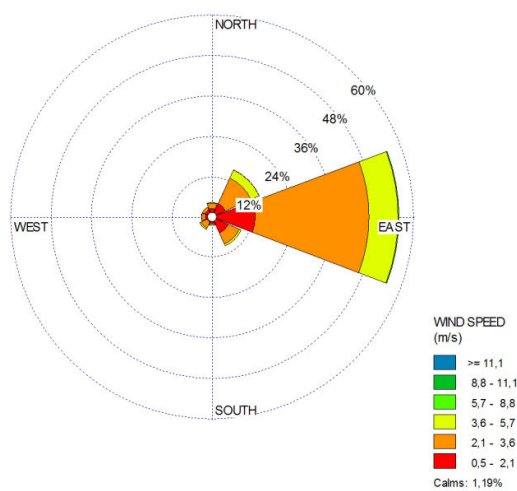


Figura 24 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 1

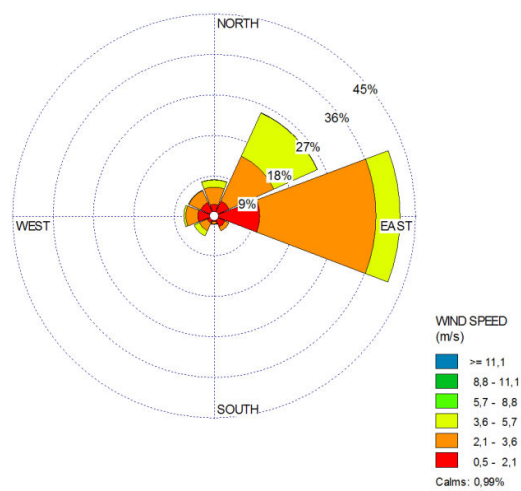


Figura 25 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 2

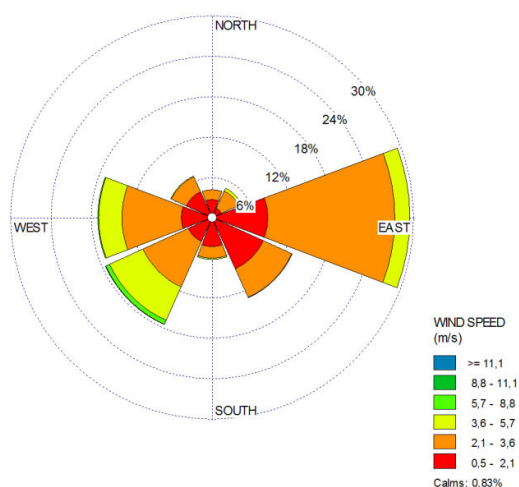


Figura 26 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 3

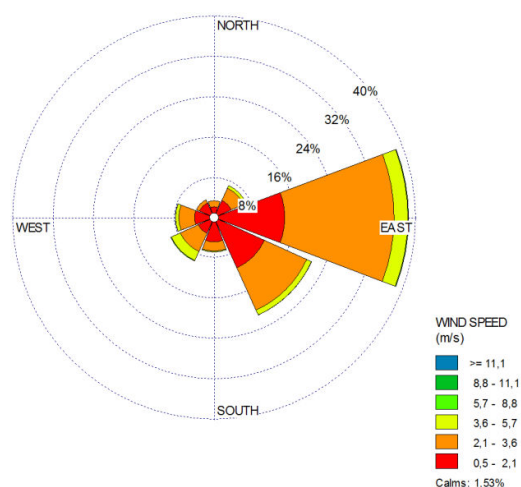


Figura 27 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 4

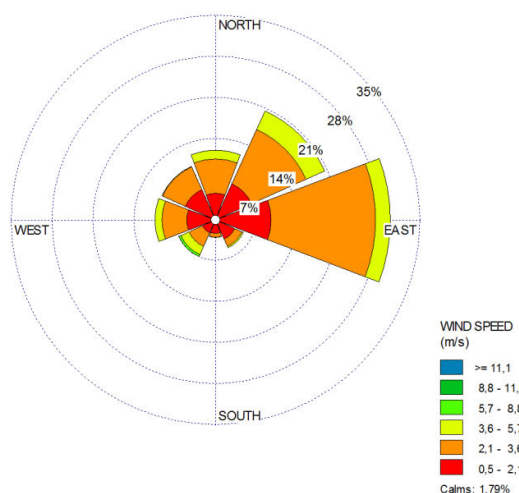


Figura 28 - Rosa dos ventos - Rio de Janeiro – Regime de Tempo 5

Conforme mencionado anteriormente, as figuras 19, 20, 24 e 25 representam as rosas dos ventos dos regimes de tempo 1 e 2 para a CNAAB e para o Rio de Janeiro, respectivamente. Estas refletem a circulação típica do ASAS ao longo do ano quando este atua sobre a região sudeste. A predominância são de ventos de quadrante norte, principalmente de leste e de nordeste. As tabelas 6 a 11 indicam a distribuição dos ventos em percentual para a CNAAB e para o Rio de Janeiro para o período de: 1985 a 2014,

2013 e 2014. Observa-se em todas as tabelas a significativa percentagem de ventos de leste e de nordeste (especialmente nos regimes de tempo 1 e 2) pela atuação do ASAS. Destaca-se as direções sudeste a sudoeste associadas a passagem de sistemas frontais (regime de tempo 3).

Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – CNAAA – 1985 a 2014									
Regime	Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste	Calmarias
1	11,06	39,76	18,19	7,75	5,08	8,57	3,82	4,22	1,50
2	12,52	44,09	16,11	4,41	4,08	8,27	4,24	5,73	0,49
3	5,54	8,47	12,61	12,36	9,49	28,48	14,40	8,15	0,44
4	8,29	18,28	16,58	15,29	10,07	15,17	8,91	6,09	1,28
5	20,89	30,94	10,94	4,84	5,10	9,05	7,84	9	1,36

Tabela 6 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo entre 1985 e 2014 – CNAAA.

Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – Rio de Janeiro- 1985 a 2014									
Regime de tempo	Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste	Calmarias
1	4,50	15,50	55,51	9,62	2,69	4,25	3,37	3,33	1,19
2	8,16	25,27	41,44	3,80	2,04	5,02	6,84	6,40	0,99
3	4,20	4,84	29,38	13,12	6,30	17,46	17,01	6,81	0,82
4	3,44	7,04	38,51	21,26	6,92	9,53	7,79	3,93	1,53
5	11,94	20,47	29,89	5,31	3,10	6,94	10,42	10,10	1,78

Tabela 7 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo entre 1985 e 2014 – Rio de Janeiro.

Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – CNAAA - 2013									
Regime de tempo	Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste	Calmarias
1	13,04	26,95	13,91	9,56	7,82	14,78	6,08	6,08	1,73
2	14,28	42,85	12,24	4,08	4,08	14,28	6,12	2,04	0
3	3,03	12,12	10,60	10,66	7,57	31,81	13,63	4,54	0
4	13,23	5,88	19,11	14,7	13,23	26,47	2,94	4,41	0
5	25,37	32,83	7,46	5,97	2,98	8,95	7,46	8,95	0

Tabela 8 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – CNAAA – 2013.

Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – CNAAA - 2014									
Regime de tempo	Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste	Calmarias
1	13	34,95	19,51	9,75	4,87	9,75	4,06	1,62	2,43
2	18,05	30,55	19,44	5,55	6,94	6,94	4,16	6,94	1,38
3	2,12	4,25	2,12	17,02	14,89	40,42	14,89	4,2	0
4	6,66	21,66	15	21,66	10	18,33	3,33	0	3,33
5	11,11	26,98	6,34	6,34	11,11	14,28	4,76	17,46	1,58

Tabela 9 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – CNAAA – 2014.

Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – Rio de Janeiro - 2013									
Regime de tempo	Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste	Calmarias
1	8,69	12,17	48,69	9,56	3,47	6,95	3,47	6,08	0,86
2	12,24	28,57	30,61	6,12	4,08	8,16	6,12	4,08	0
3	0	10,60	31,81	10,62	6,06	22,72	13,63	4,54	0
4	5,88	7,35	30,88	22,05	8,82	14,70	7,35	2,94	0
5	11,94	23,88	29,85	5,97	0	2,95	14,92	8,95	1,49

Tabela 10 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – Rio de Janeiro – 2013.

Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – Rio de Janeiro - 2014									
Regime de tempo	Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste	Calmarias
1	3,25	10,56	58,53	8,13	2,43	5,69	6,5	4,87	0
2	9,72	18,05	44,44	5,55	2,77	5,55	5,55	6,94	1,38
3	4,25	2,12	23,4	23,4	12,76	10,63	19,14	4,25	0
4	3,33	53,33	20	8,33	20	6,66	6,66	1,67	0
5	11,11	11,11	36,5	7,93	0	11,11	6,34	11,11	4,76

Tabela 11 - Distribuição das direções dos ventos (%) para os regimes de tempo – Rio de Janeiro – 2014.

O mesmo cenário também pode ser observado na distribuição temporal dos ventos para os anos de 2013 e 2014 para o Rio de Janeiro e para a CNAAA.

Para os regimes de tempo 3 e 4, o padrão de ventos (figuras 21, 22, 26 e 27) predominantes é de quadrante sul. Antes da passagem das frentes, os ventos em superfície são predominantemente de quadrante norte, a mudança desta direção para o quadrante sul indica a entrada dos sistemas frontais na região. Os percentuais para o período de 30 anos para a CNAAA e para o Rio indicam essa predominância (tabelas 6 e 7).

Fenômenos das diversas escalas, de global a local, influenciam na variabilidade dos regimes de ventos de uma região. Especialmente, nas regiões litorâneas como Rio de Janeiro e em Angra dos Reis, onde se situa o CNAAA, circulações locais como os sistemas de brisas afetam o padrão de ventos.

Quanto à dispersão, Papanastasiou et al. (2010), Oke (1978), Abbs & Physick (1992) Simpson (1994) e Gangoiti et al. (2002) destacam que os sistemas de brisas geram impactos tanto no clima local quanto na qualidade do ar. As brisas podem provocar situações onde os poluentes emitidos próximos à superfície podem ficar presos à camada limite atmosférica aumentando a concentração em superfície.

A habilidade de dispersão pode ser afetada pelos mecanismos de brisa, conforme pontuados por Damilano et al. (2006). A circulação da brisa marítima, durante o verão, faz com que massas de ar sejam transportadas para o continente carregando poluentes “envelhecidos”, tais como hidrocarbonetos e NOx. Em um efeito de re-circulação de poluentes, que misturados a outros na atmosfera facilitam a produção de oxidantes fotoquímicos que podem gerar altas concentrações de ozônio.

Essas condições podem explicar as outras direções obtidas fora do esperado para cada regime. Cita-se que as direções esperadas para os regimes 1 e 2 seriam de quadrante norte devido à ação do ASAS, entretanto foram captados também ventos de quadrante sul. Ou mesmo a análise por cluster pode representar um sistema de grande escala que não está atuando sobre uma região específica, conforme se observa nas figuras 29 a 48.

Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA)

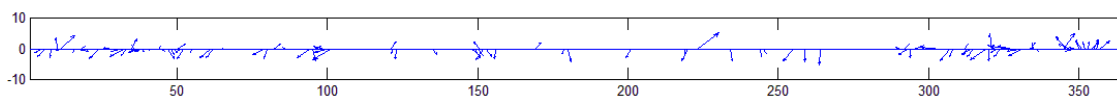


Figura 29 - CNAAB – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 1 no ano de 2013

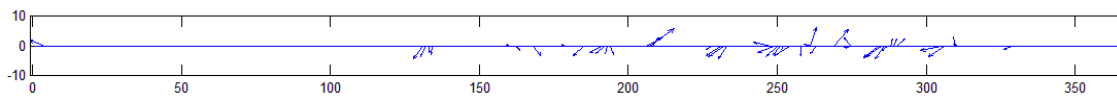


Figura 30 - CNAAB – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 2 no ano de 2013

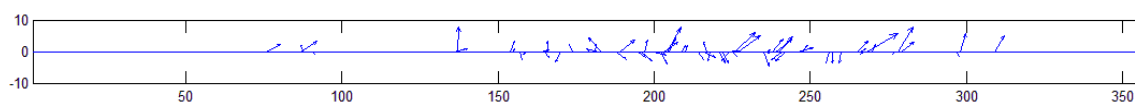


Figura 31 - CNAAB – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 3 no ano de 2013

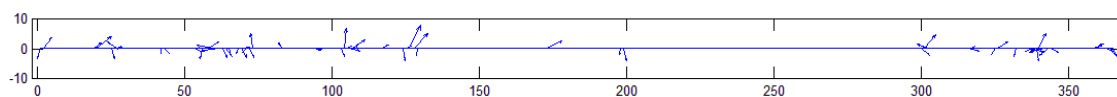


Figura 32 - CNAAB – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 4 no ano de 2013

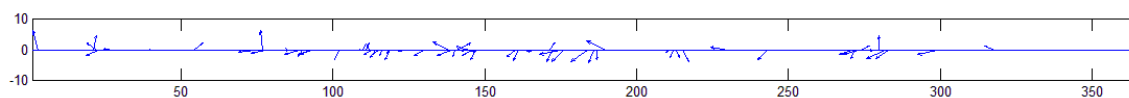


Figura 33 - CNAAB – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 5 no ano de 2013

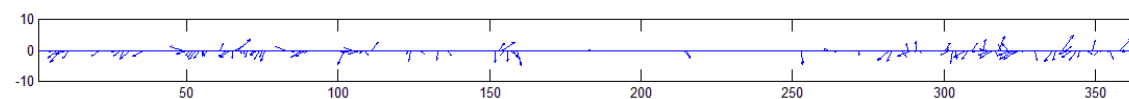


Figura 34 - CNAAB – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 1 no ano de 2014

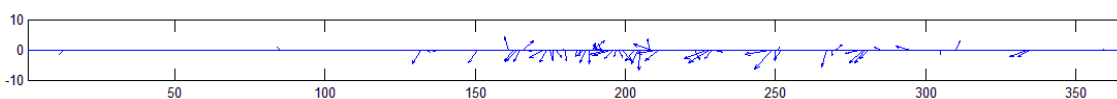


Figura 35 - CNAAB – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 2 no ano de 2014

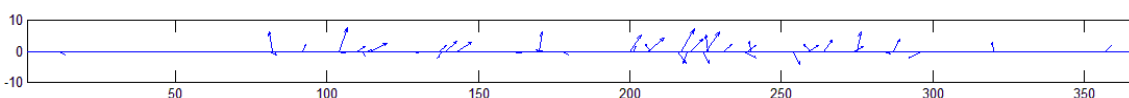


Figura 36 - CNAAB – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 3 no ano de 2014

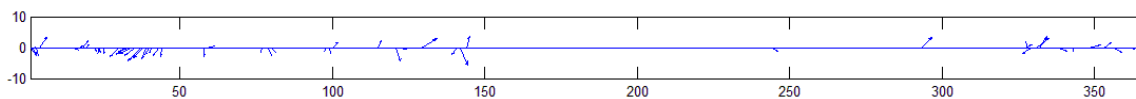


Figura 37 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 4 no ano de 2014

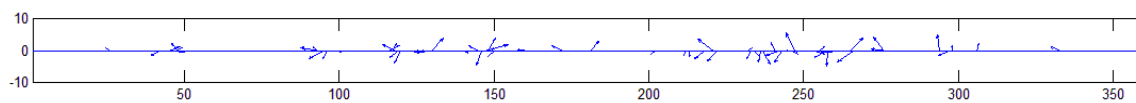


Figura 38 - CNAAA – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 5 no ano de 2014

Rio de Janeiro

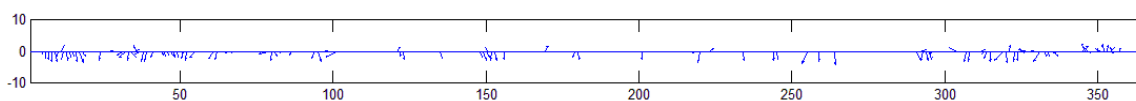


Figura 39 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 1 em 2013

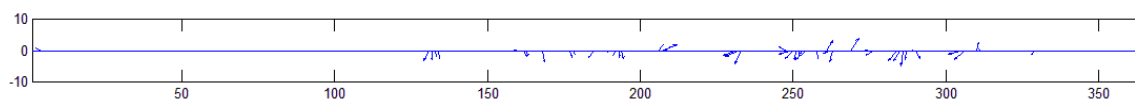


Figura 40 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 2 em 2013

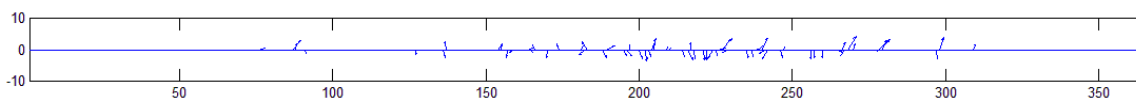


Figura 41 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 3 em 2013

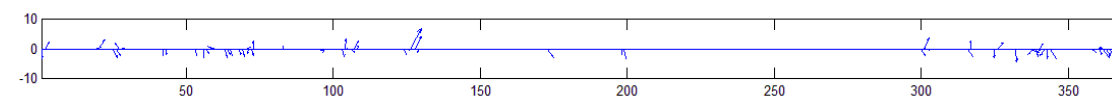


Figura 42 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 4 em 2013

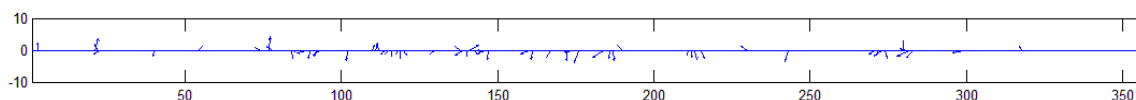


Figura 43 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 5 em 2013

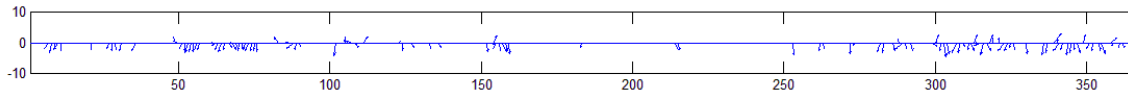


Figura 44 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 1 em 2014

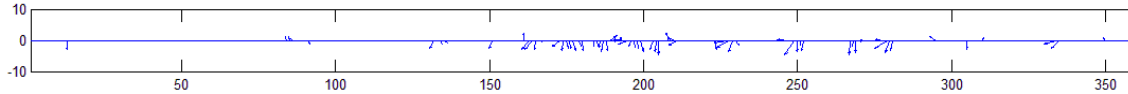


Figura 45 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 2 em 2014

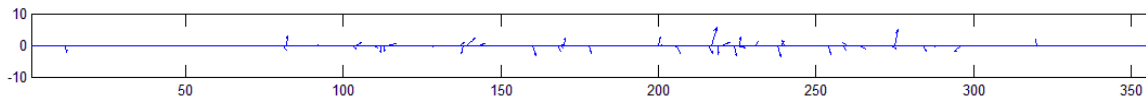


Figura 46 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 3 em 2014

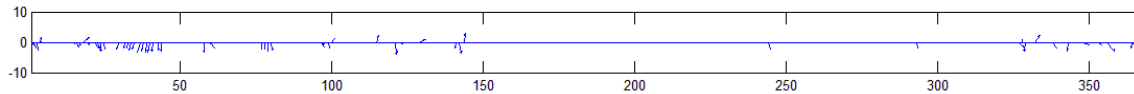


Figura 47 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 4 em 2014

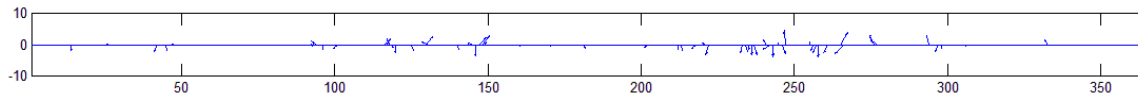


Figura 48 - Rio de Janeiro – Distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para o Regime de Tempo 5 em 2014

A temperatura pode alterar as condições de dispersão ao influenciar: na química dos poluentes, nos processos evaporativos (aumento de temperatura acarreta em maior taxa de evaporação) e nas condições de convecção. Um aumento da temperatura pode gerar movimentos verticais ascendentes intensos (convecção) carregando os poluentes para os altos níveis afetando assim a dispersão vertical na atmosfera.

O perfil vertical de temperatura fornece informações sobre as condições de estabilidade atmosférica que indicam a capacidade do poluente em se expandir verticalmente. Em condições normais, a temperatura decai com a altura, entretanto, em algumas situações observa-se um aumento de temperatura com a altura. Em casos, onde a atmosfera encontra-se estável, o ar mais frio situa-se próximo à superfície abaixo do ar mais quente, diante desta inversão térmica os movimentos verticais são limitados impedindo que os poluentes em superfície possam ascender e dispersar e

consequentemente aumentando as concentrações. Quando há instabilidade processos de convecção e turbulência são aumentados o provocando maior mistura dos poluentes na atmosfera.

Outro fator relvado no estudo dos fenômenos de dispersão de efluentes é a classificação da estabilidade atmosférica. De Oliveira (2010) pontua que através da classificação da estabilidade pode-se estimar a dispersão e o comportamento do poluente na atmosfera localmente e a curto (em um caso acidental) e a longo prazo após sua emissão.

O papel da radiação está associado principalmente ao aquecimento/resfriamento da superfície e nas reações fotoquímicas (como as de formação do ozônio). Maiores períodos de insolação podem implicar em um aquecimento da superfície gerando movimentos ascendentes, turbulência e mistura dos poluentes próximo à superfície.

Os processos naturais de limpeza e remoção de poluentes na atmosfera são divididos em dois: a deposição úmida e a deposição seca. Na primeira, a precipitação (na forma de gotas e gotículas de chuva, cristais de gelo, neve) promove a dissolução dos gases solúveis, levando-os junto com a precipitação, reduzindo sua concentração. Em geral, está associada à condições de tempo instáveis o que favorece a dispersão. Cabe ressaltar que este mecanismo pode gerar as chamadas chuvas ácidas, ou seja, quando há presença de significativa quantidade de compostos ácidos na chuva.

A deposição seca acontece sem a presença de precipitação, por ação do vento e de processos de difusão gasosa que transportam os poluentes para a superfície. Partículas de maiores proporções tendem a se depositar mais rapidamente que as menores, sendo estas últimas transportadas por grandes distâncias e altitudes antes de sua deposição.

Korsakissok et al. (2013) destaca a importância dos processos de limpeza para se determinar o comportamento atmosférico de radionuclídeos, uma vez que a sua deposição no solo pode contribuir nas dosagens gama da área.

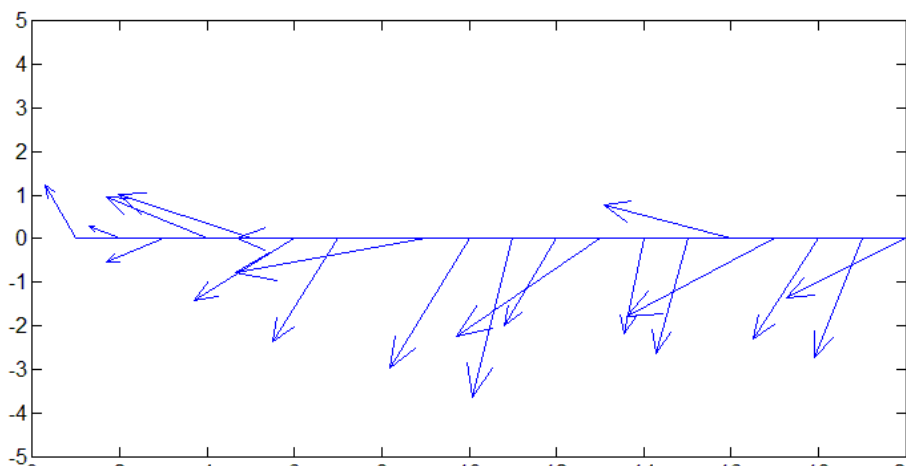
Conforme discutido anteriormente, os parâmetros meteorológicos e as condições de tempo são fatores que afetam as características de dispersão e trajetória dos poluentes na atmosfera. Assim, para cada um dos episódios simulados foram avaliadas a evolução temporal dos principais parâmetros meteorológicos a fim de identificar seus efeitos sobre a dispersão dos poluentes para o cenário acidental.

Episódio 1 – Regime de tempo 1 – 06 a 11 de janeiro de 2014

A evolução temporal dos campos de pressão ao nível médio do mar (figuras 51 a 56) mostra que durante este período o Estado do Rio de Janeiro esteve sobre atuação do ramo do ASAS, com variações entre 1014hPa e 1018 hPa. O centro dos ASAS apresentou variações entre 1020hPa e 1028 hPa deslocando-se entre os 39°S e 24°S e zonalmente entre os 25°W e 0°W. Sob a influência do ASAS as condições de tempo no Rio foram mantidas estáveis, com tempo bom e sem precipitação, inibindo a formação de nebulosidade. No dia 05 a região encontrava-se sob a ação do anticiclone migratório na retaguarda do sistema frontal que estava sobre o Rio entre os dias 02 e 04 (imagens não mostradas). O AMP nos dias posteriores se acoplou ao ASAS. Outra frente foi formada no dia 08 (figura 54) sobre o oceano mas não atingiu o Estado do Rio de Janeiro que permaneceu sobre influência do ASAS.

Quanto aos ventos, as (figuras 57 a 62) mostram a predominância da direção nordeste sobre o Estado do Rio de Janeiro durante todo o período, o domínio da circulação de grande escala imposta pela ação do ASAS.

Os perfis de ventos (m s^{-1}) das figuras 49 e 50 mostram a distribuição temporal entre os dias 06 e 09 às 00:00Z, 06:00Z, 12:00Z e 18:00Z para a CNAAA e a cidade do Rio de Janeiro. Em ambas as imagens é possível observar o predomínio de ventos de quadrante norte quando a região fica sob influência do ASAS. Tal padrão influencia diretamente na dispersão da pluma, conforme será avaliado posteriormente.



*Figura 49 -
perfil temporal
dos ventos(ms^{-1})
para o Rio de
Janeiro de 6 a
09 de Janeiro
de 2014 às
00:00Z, 06:00Z,
12:00Z e
18:00Z*

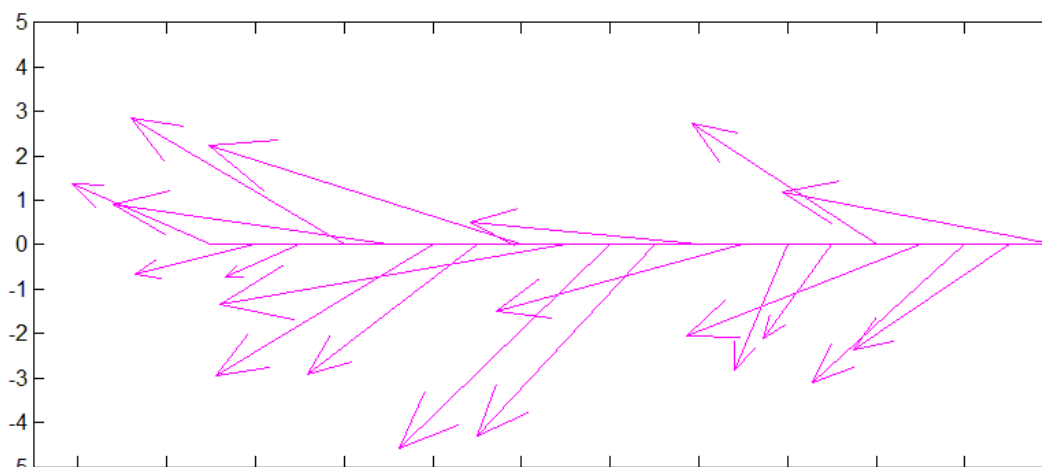


Figura 50 – perfil temporal dos ventos ($m s^{-1}$) para CNAAB de 6 a 09 de Janeiro de 2014 às 00:00Z, 06:00Z, 12:00Z e 18:00Z

Nas cartas de temperatura ($^{\circ}C$) (figuras 63 a 68), em grande escala, verifica-se o aumento das temperaturas na direção do Equador. Abaixo dos $30^{\circ}S$, observa-se um maior gradiente de temperaturas. Para a região do Estado do Rio de Janeiro as temperaturas sofreram pequenas alterações entre os $27^{\circ}C$ a $30^{\circ}C$. Nos dias 05 e 06 (figuras 63 e 64) as temperaturas ficaram entre os $24^{\circ}C$ e $27^{\circ}C$ pela influência do anticiclone migratório pós-frontal. Assim, sem a atuação de nenhum outro sistema, as temperaturas não sofreram alterações.

Analisando somente as condições meteorológicas para este período, sob o domínio do ASAS são geradas condições de grande estabilidade com pouca mistura de poluentes na vertical e conseqüentemente pouca dispersão.

Campos de Pressão ao nível médio do mar (hPa)

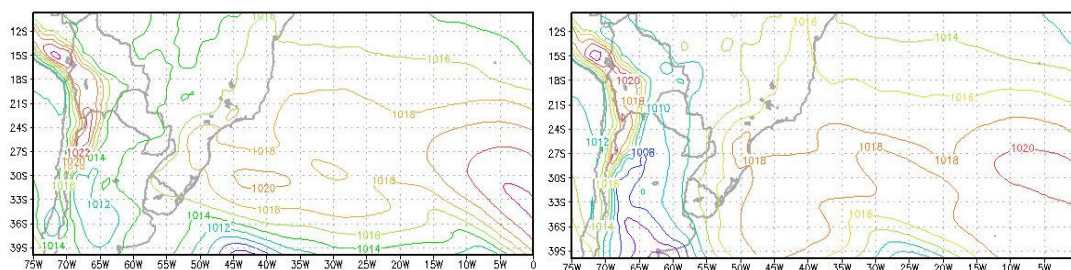


Figura 51 - Campo de PNMM (hPa) em 05/01/2014 Figura 52 - Campo de PNMM (hPa) em 06/01/2014

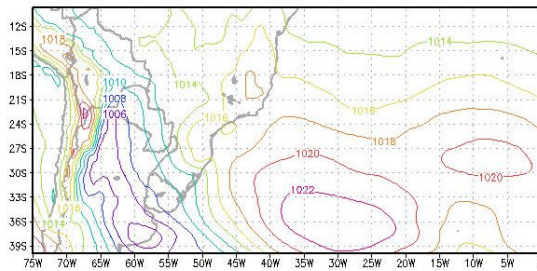


Figura 53 - Campo de PNMM (hPa) para 07/01/2014

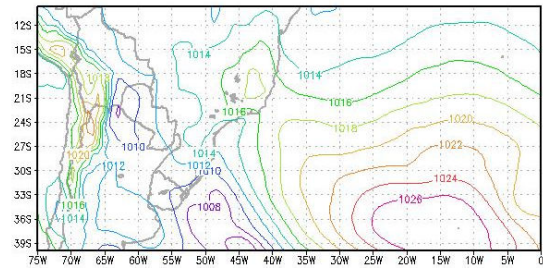


Figura 54 - Campo de PNMM (hPa) para 08/01/2014

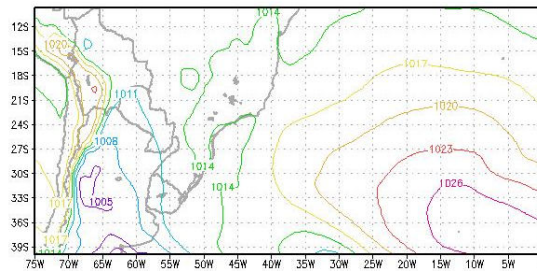


Figura 55 - Campo de PNMM (hPa) para 09/01/2014

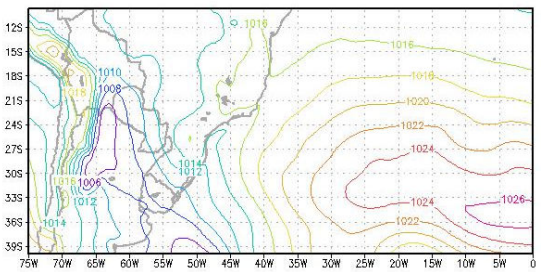


Figura 56- Campo de PNMM (hPa) para 10/01/2014

Linhas de corrente dos ventos

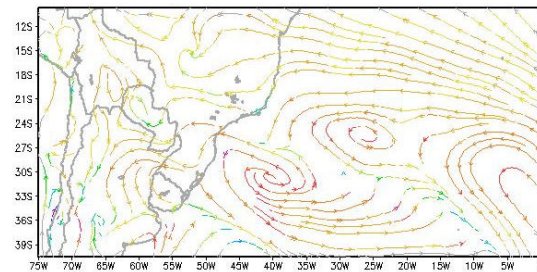


Figura 57– Linhas de corrente para o campo de ventos em 05/01/2014.

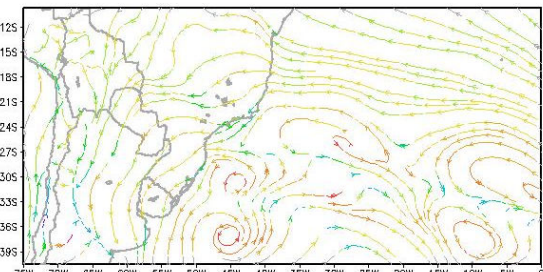


Figura 58 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 06/01/2014

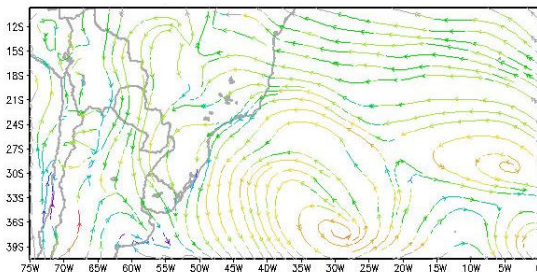


Figura 59 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 07/01/2014

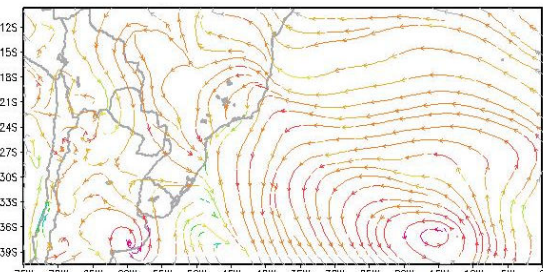


Figura 60 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 08/01/2014

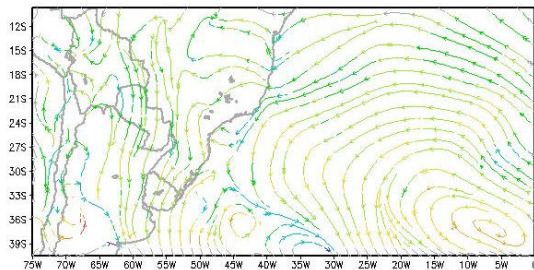


Figura 61 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 09/01/2014

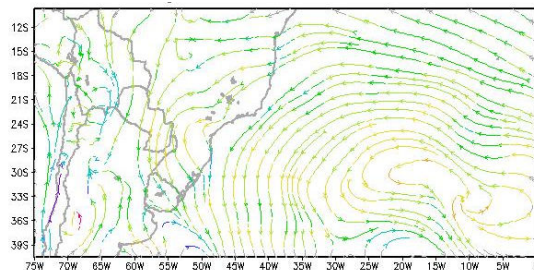


Figura 62– Linhas de corrente para o campo de ventos em 10/01/2014

Campos de Temperatura (°C)

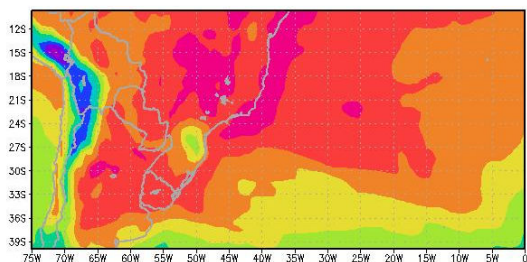


Figura 63 – Campo de temperatura (°C) para 05/01/2014

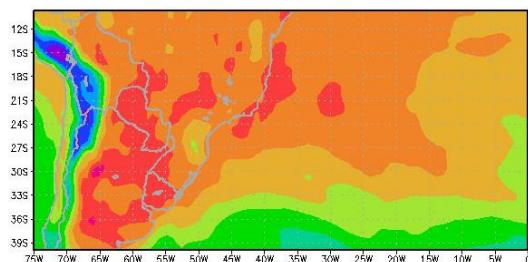


Figura 64 – Campo de temperatura (°C) para 06/01/2014

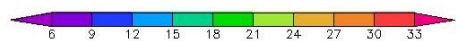
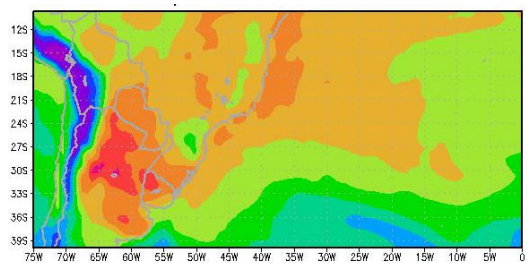


Figura 65 – Campo de temperatura (°C) para 07/01/2014

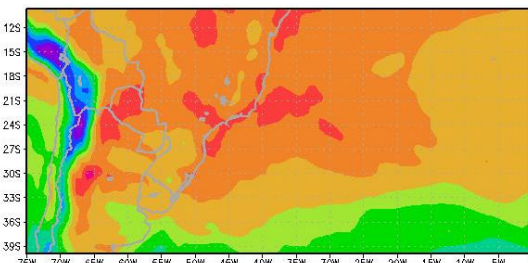


Figura 66 – Campo de temperatura (°C) para 08/01/2014

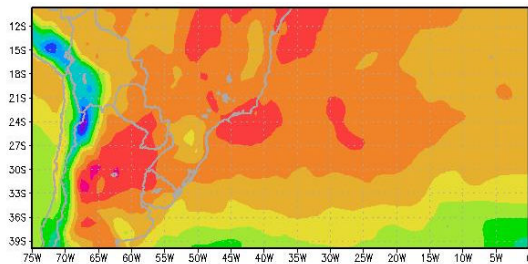


Figura 67 – Campo de temperatura (°C) para 09/01/2014

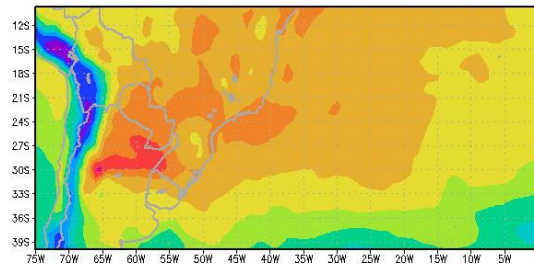


Figura 68 – Campo de temperatura (°C) para 10/01/2014

Perfis verticais de temperatura do ar (curva em preto) e de temperatura do ponto de orvalho (curva em roxo)

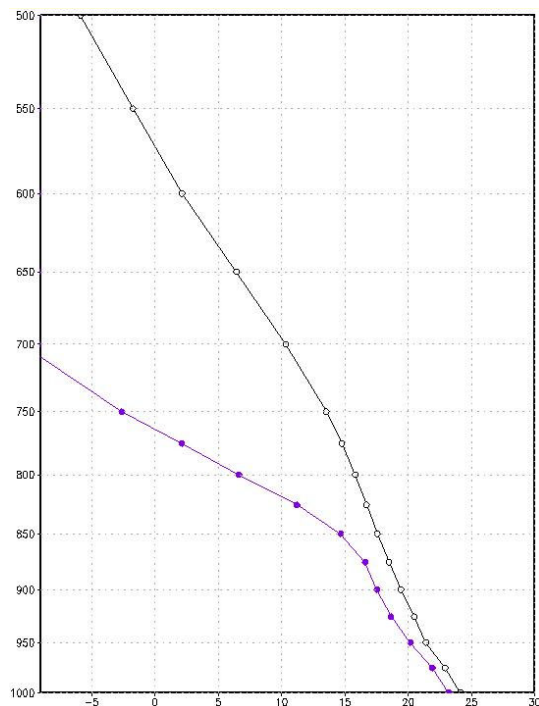


Figura 69 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 05/01/2014 12Z

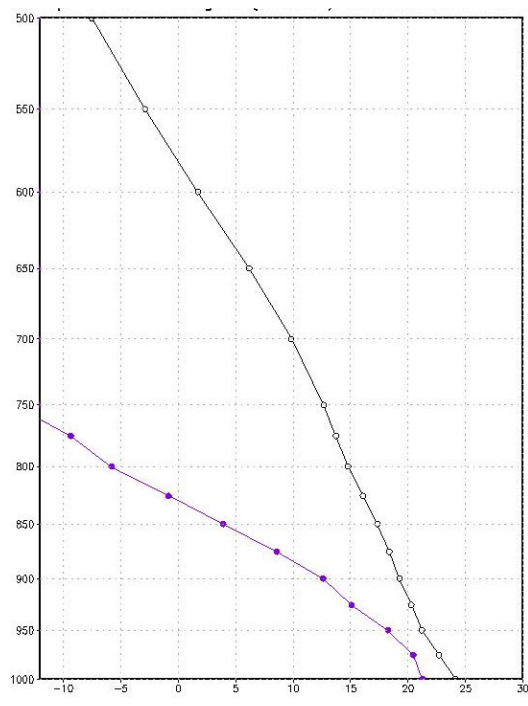


Figura 70 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 06/01/2014 12Z

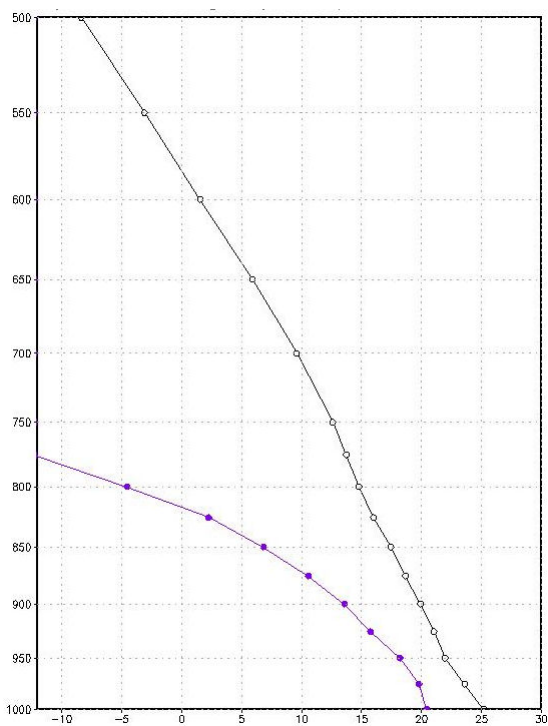


Figura 71 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 07/01/2014 12Z

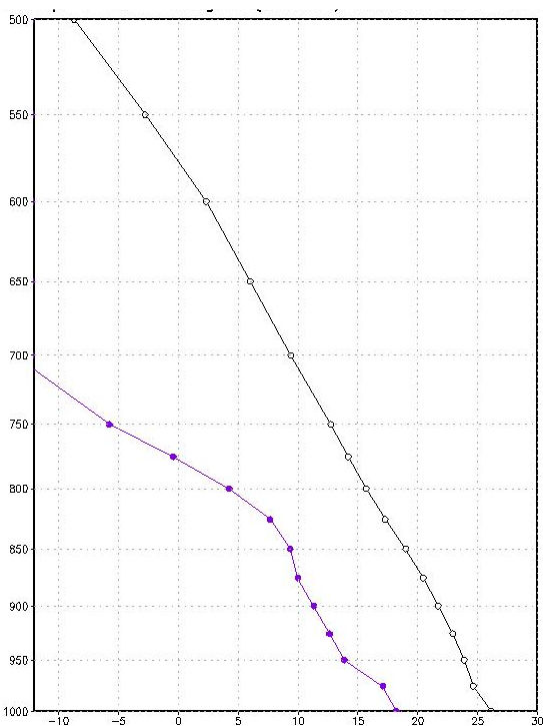


Figura 72 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 08/01/2014 12Z

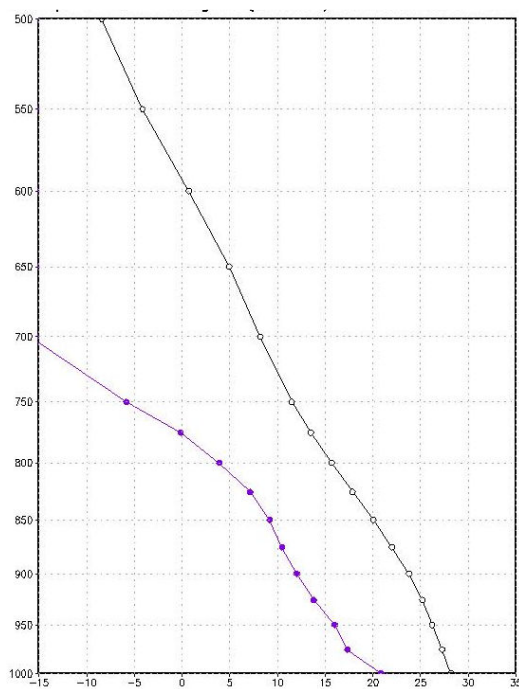


Figura 73 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 09/01/2014 12Z

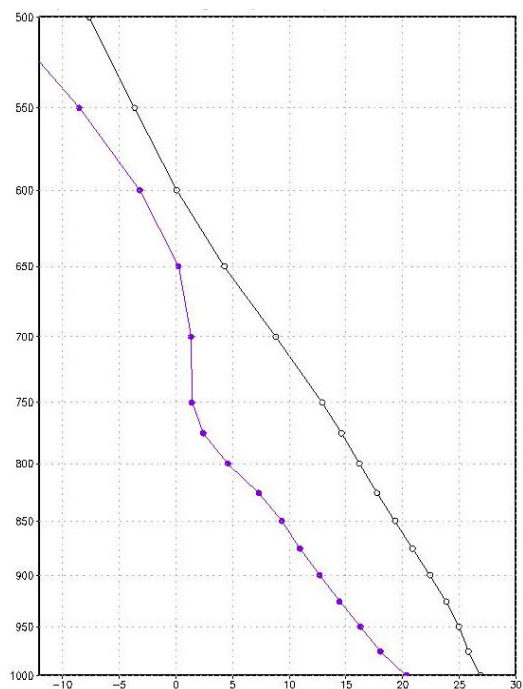


Figura 74 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 10/01/2014 12Z

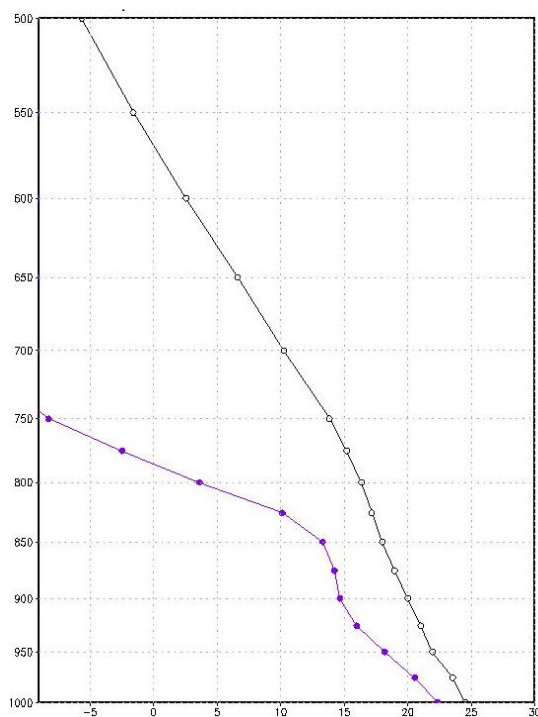


Figura 75 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 05/01/2014 12Z

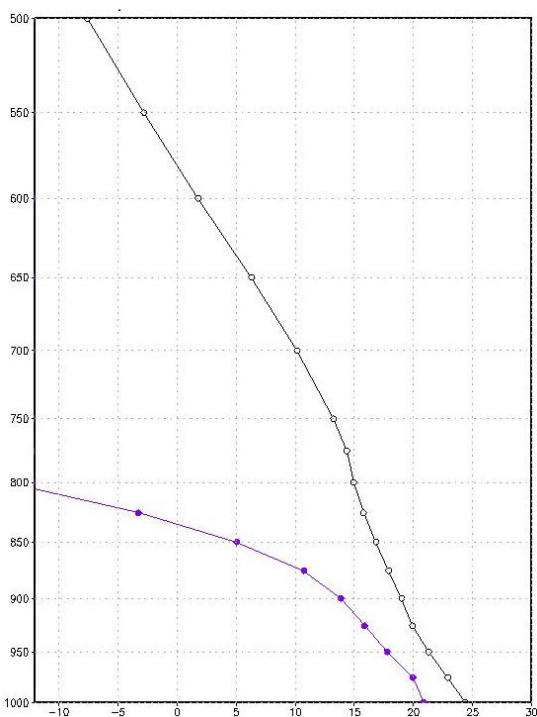


Figura 76 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 06/01/2014 12Z

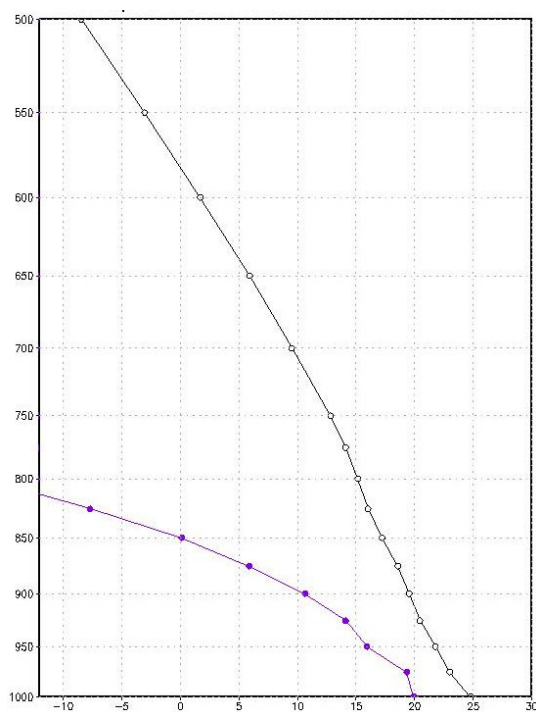


Figura 77 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 07/01/2014 12Z

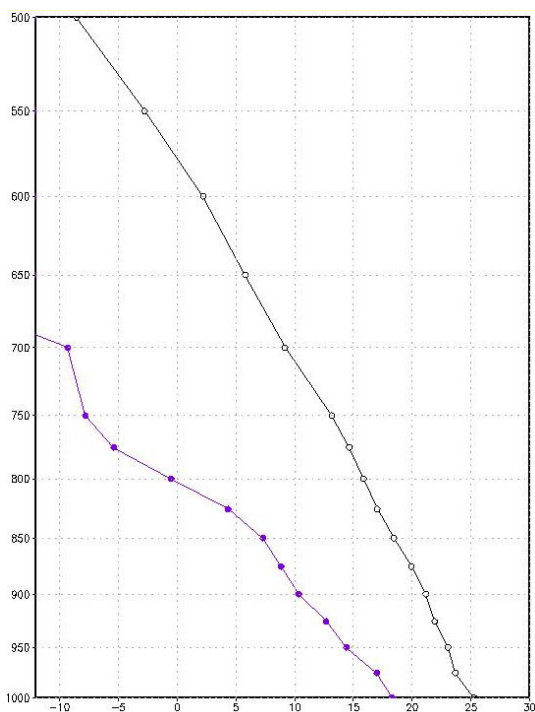


Figura 78 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 08/01/2014 12Z

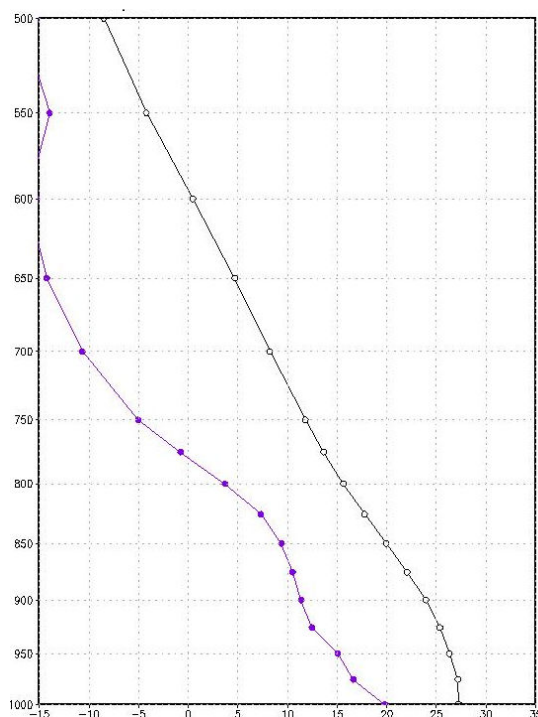


Figura 79 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 09/01/2014 12Z

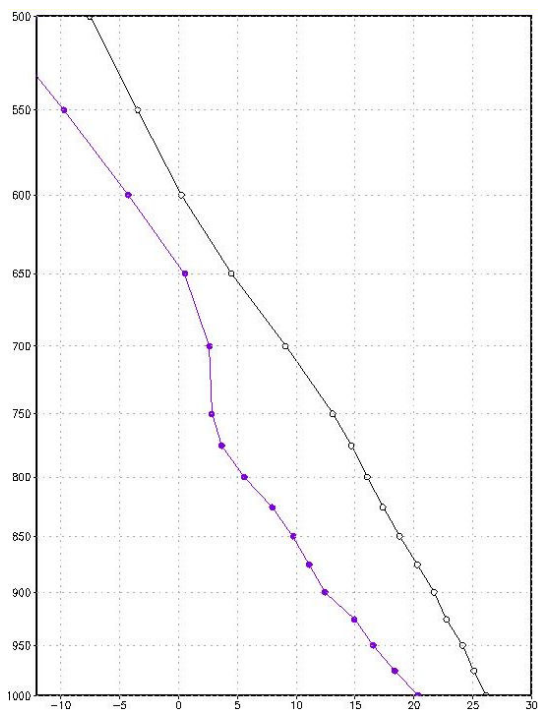


Figura 80 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 10/01/2014 12Z

Episódio 2 – Regime de tempo 3 – 22 a 31 de julho de 2013

As imagens dos campos de pressão ao nível médio do mar (hPa) (figuras 83 a 92) indicam a passagem de dois sistemas frontais pela região sudeste. O primeiro se formou a partir de um centro de baixa pressão próximo à costa da região sul no dia 20 (imagem não mostrada) e atingiu o sudeste no dia 22 (figura 83).

Nos dias posteriores, o sistema frontal continuou a atuar sobre a região sudeste mas, não mais sobre o Rio. No dia 24 (figura 85) verifica-se o anticiclone migratório polar, cujo centro encontra-se sobre o norte da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul, passa a atuar sobre o Rio de Janeiro, se agrupando ao ASAS no dia 25 (figura 86). No dia 26 (figura 87), observa-se a formação de um ciclone próximo à costa do Rio de Janeiro do qual deriva o sistema frontal que passa a atuar sobre a região até se deslocar no dia 28 (figura 89) para o oceano. Neste dia, já se observa ação do anticiclone migratório pós-frontal sobre o sudeste, permanecendo assim até o dia 31 quando se acopla ao ASAS (figura 92).

Destaca-se a intensificação do ASAS e o aprofundamento do sistema de baixa pressão entre os dias 24 e 27 (figura 85 e 88), variando respectivamente entre 1030hPa e 1036 hPa.

As condições de tempo na região, pela ação do ASAS apresenta estabilidade com pouca mistura vertical e, portanto fraca dispersão dos poluentes. Com a aproximação do sistema de baixa pressão ocorrem condições de instabilidade e de grande turbulência o que favorece a dispersão e remoção dos poluentes da atmosfera.

A circulação destes sistemas se reflete no campo de linha de corrente dos ventos (figuras 93 a 102). Em um cenário onde sobre o domínio do ASAS a direção dos ventos é predominantemente de quadrante norte e com a entrada do sistema frontal os ventos viram para quadrante sul. Após a frente, o anticiclone passa a atuar sobre a região. No dia 22 (figura 93) observa-se uma área de convergência na direção da costa do Rio, com ventos de sul devido ao sistema frontal. Essa direção permanece nos dias 23 e 24 (figuras 94 e 95) mesmo com a frente se deslocando para norte. No dia 25 (figura 96) a circulação é mantida no dia 26 (figura 97) pela ação do anticiclone migratório (na costa do Rio Grande do Sul). No dia 27 (figura 98) observa-se o centro de baixa pressão formado na costa norte do Rio Grande do Sul, de Santa Catarina e do Paraná. Esse sistema altera o padrão de circulação sobre a região do Rio que mesmo sobre a ação do ASAS apresenta um padrão de ventos de sul.

Nas figuras 81 e 82 que representam a distribuição temporal dos ventos ($m s^{-1}$) entre o período de 22 a 28 de julho de 2013, às 00:00Z, 06:00Z, 12:00Z e 18:00Z para a CNAAB e a cidade do Rio de Janeiro, verifica-se que durante todos os horários, os ventos possuem uma direção de quadrante sul, devido a influência da circulação de grande escala associada a passagem da frente pela região. Os ventos de quadrante norte, observados no período inicial de amostragem, antes da entrada da frente. Tais condições influenciam na direção da pluma que se desloca na direção norte/nordeste para o interior do continente, conforme observado nas figuras 137 e 138, especialmente dentro da CLA .

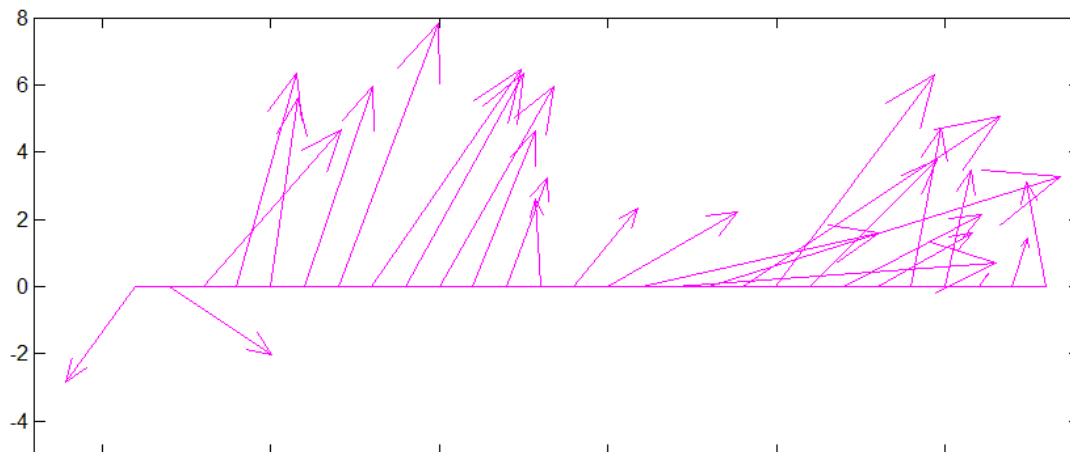


Figura 81 – Distribuição do vento ($m s^{-1}$) para a CNAAA, entre os dias 22 e 27 de julho de 2013, 4 vezes por dia

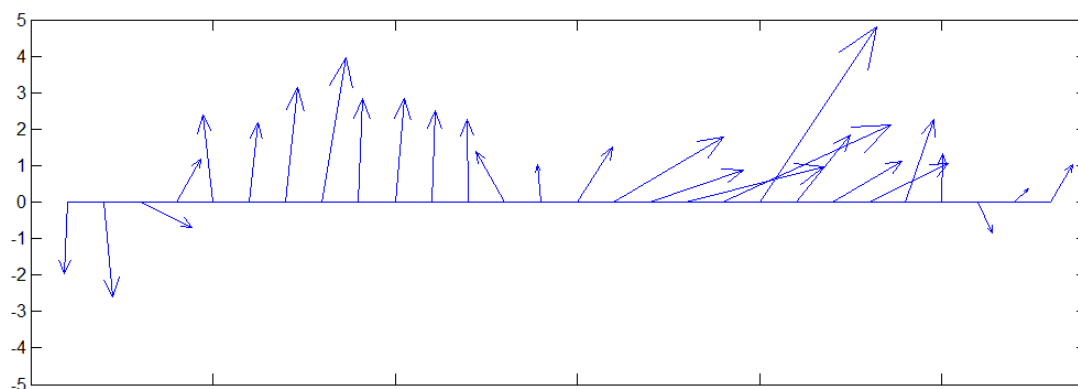


Figura 82 - Distribuição do vento ($m s^{-1}$) para o Rio de Janeiro, entre os dias 22 e 27 de julho de 2013, 4 vezes por dia.

Em relação à temperatura (figuras 103 a 112) observa-se que a mesma mantém-se entre os 15°C e 20°C na região do Rio de Janeiro devido a entrada dos sistemas frontais e dos anticiclones migratórios (em geral, ar frio e seco). Nota-se que neste período, o efeito da sazonalidade, em que as temperaturas encontram mais baixas que no episódio 1 (período de verão).

Campos de Pressão ao nível médio do mar (hPa)

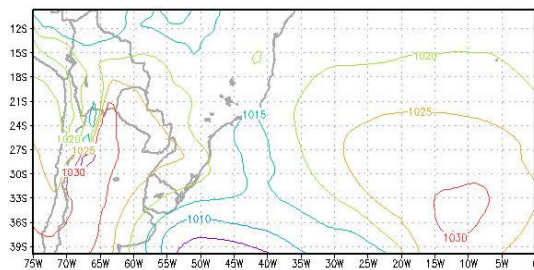


Figura 83 - Campo de PNMM (hPa) em 22/07/2013

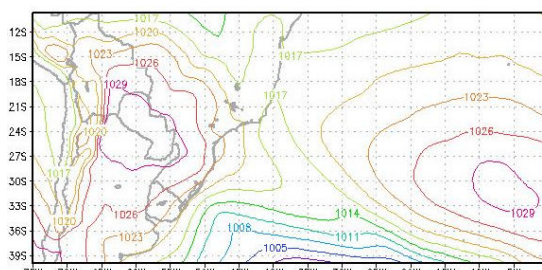


Figura 84 - Campo de PNMM (hPa) em 23/07/2013

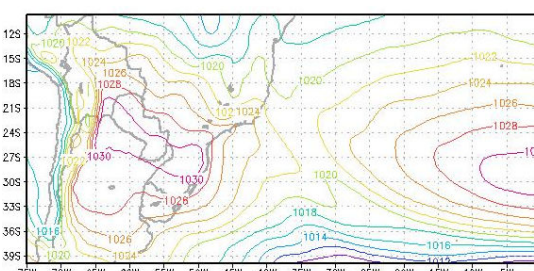


Figura 85 - Campo de PNMM (hPa) em 24/07/2013

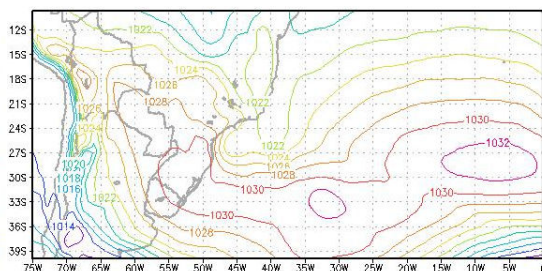


Figura 86 - Campo de PNMM (hPa) em 25/07/2013

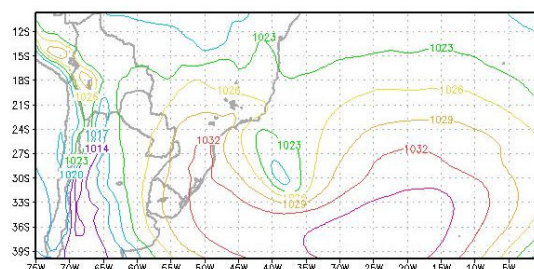


Figura 87 - Campo de PNMM (hPa) em 26/07/2013

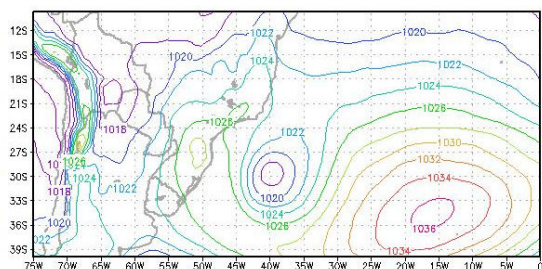


Figura 88 - Campo de PNMM (hPa) em 27/07/2013

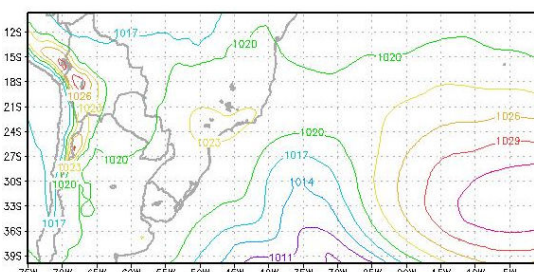


Figura 89 - Campo de (hPa) PNMM em 28/07/2013

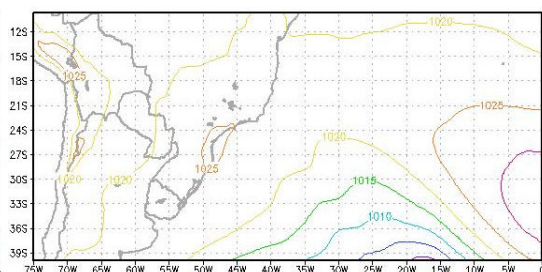


Figura 90 - Campo de PNMM (hPa) em 29/07/2013

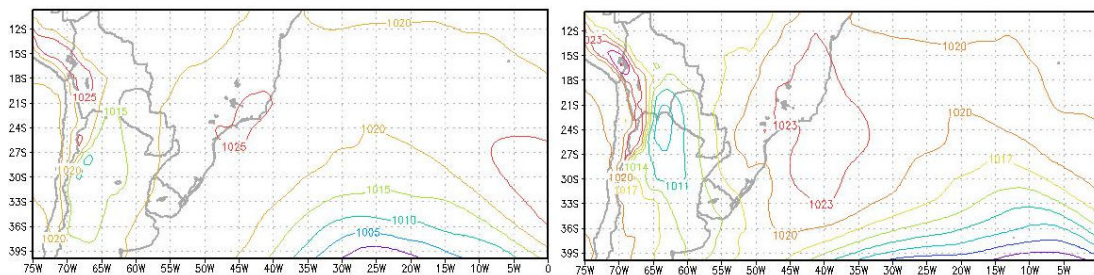


Figura 91 - Campo de PNMM (hPa) em 30/07/2013 Figura 92 - Campo de PNMM (hPa) em 31/07/2013

Linhas de correntes dos ventos

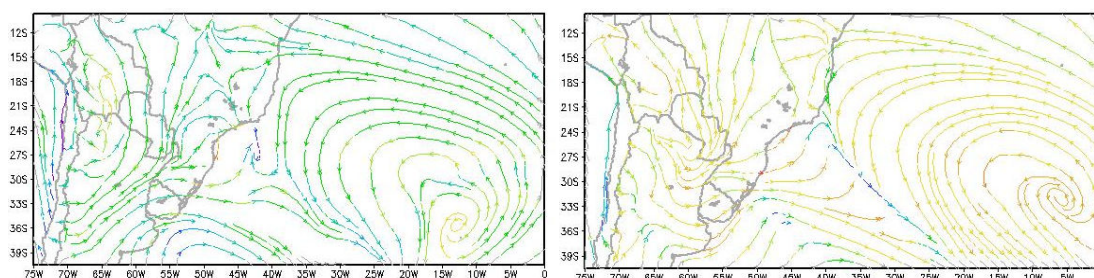


Figura 93 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 22/07/2013

Figura 94 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 23/07/2013

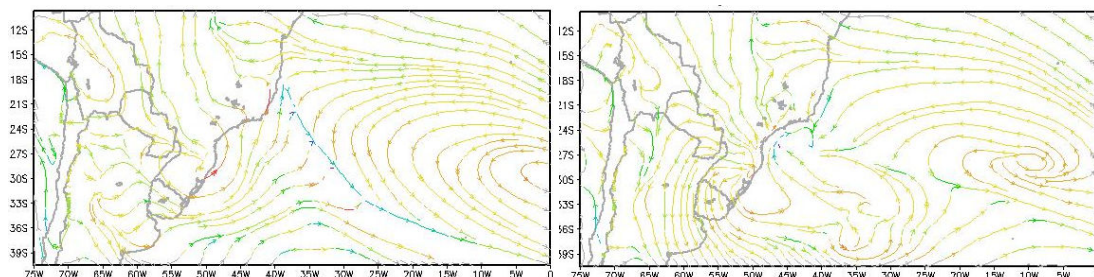


Figura 95 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 24/07/2013

Figura 96 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 25/07/2013

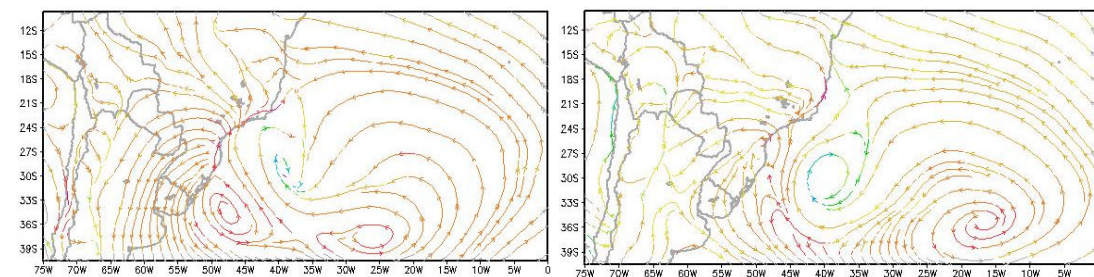


Figura 97 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 26/07/2013

Figura 98 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 27/07/2013

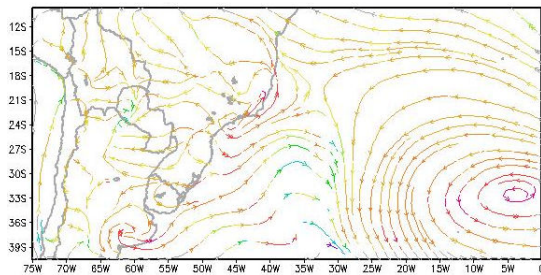


Figura 99 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 28/07/2013

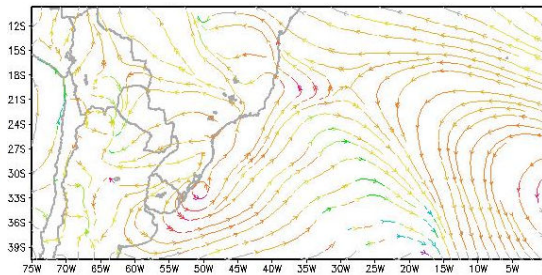


Figura 100 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 29/07/2013

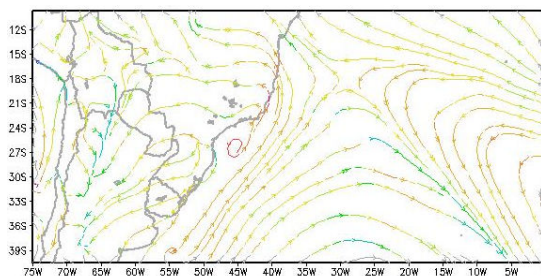


Figura 101 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 30/07/2013

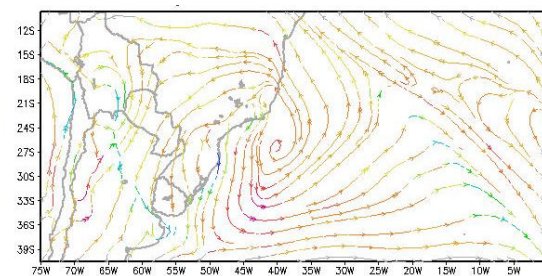


Figura 102 – Linhas de corrente para o campo de ventos em 31/07/2013

Campo de temperatura (°C)

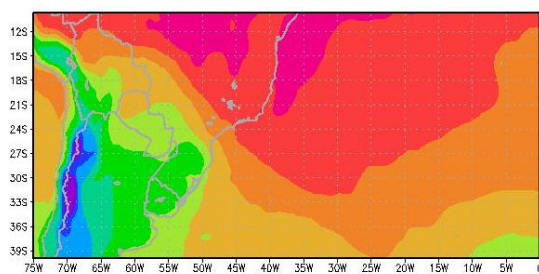


Figura 103 – Campo de temperatura (°C) para 22/07/2013

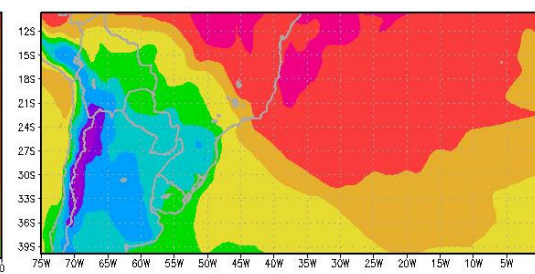


Figura 104 – Campo de temperatura (°C) para 23/07/2013

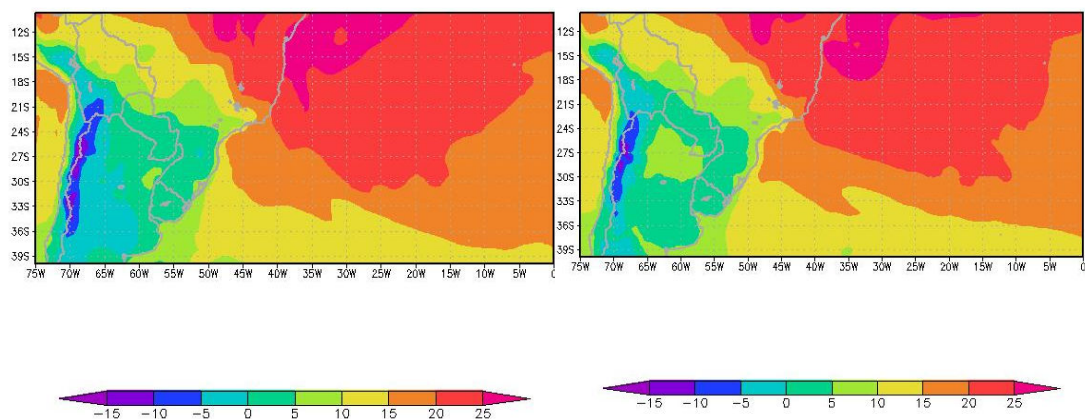


Figura 105 – Campo de temperatura (°C) para 24/07/2013

Figura 106 – Campo de temperatura (°C) para 25/07/2013

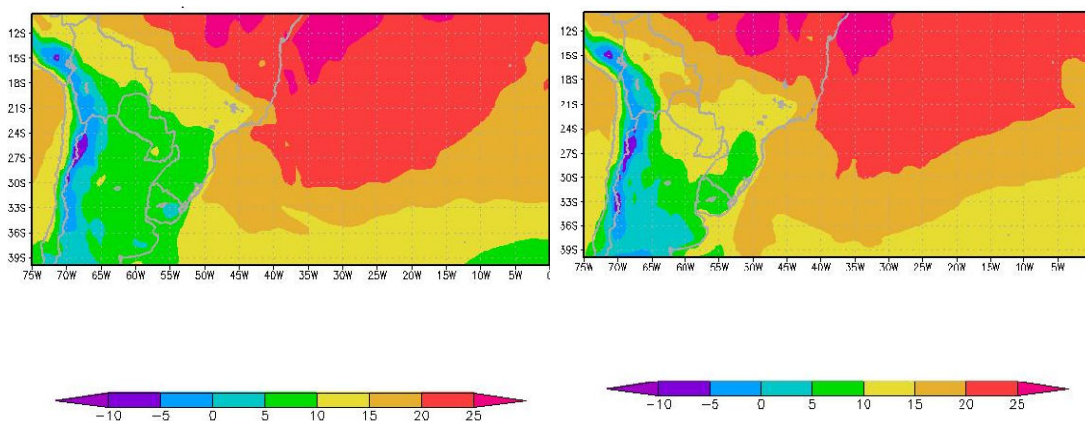


Figura 107 – Campo de temperatura (°C) para 26/07/2013

Figura 108 – Campo de temperatura (°C) para 27/07/2013

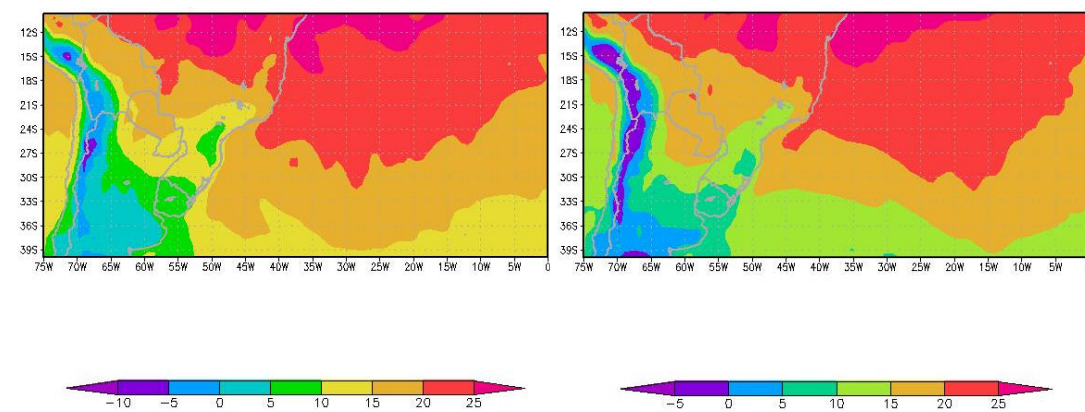


Figura 109 – Campo de temperatura (°C) para 28/07/2013

Figura 110 – Campo de temperatura (°C) para 29/07/2013

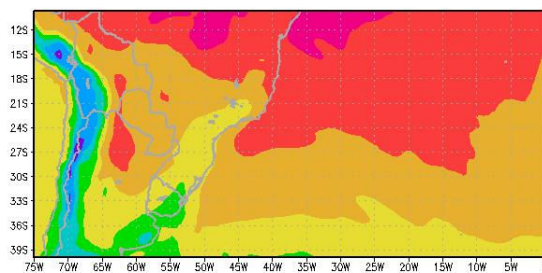


Figura 111 – Campo de temperatura (°C) para 30/07/2013

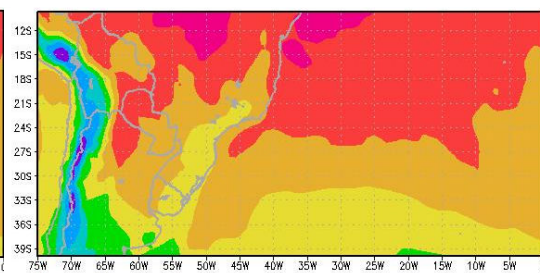


Figura 112 – Campo de temperatura(°C) para 31/07/2013

Perfis verticais de temperatura do ar (curva em preto) e de temperatura do ponto de orvalho (curva em roxo)

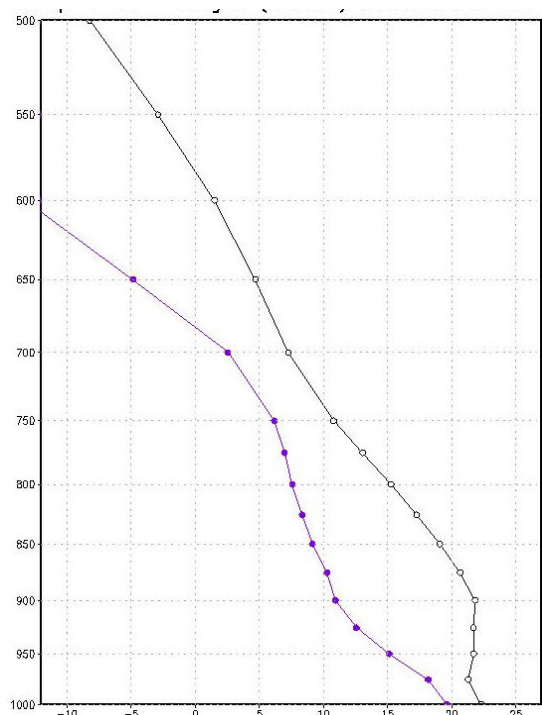


Figura 113– Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 20/07/2013 12Z

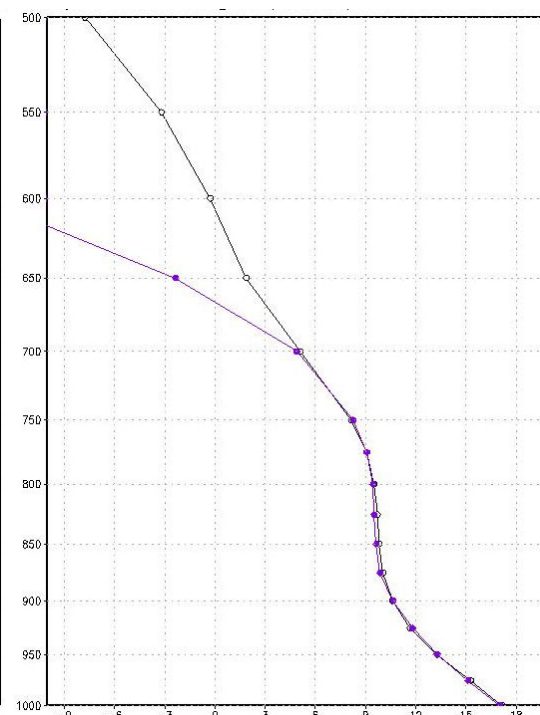


Figura 114– Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 21/07/2013 12Z

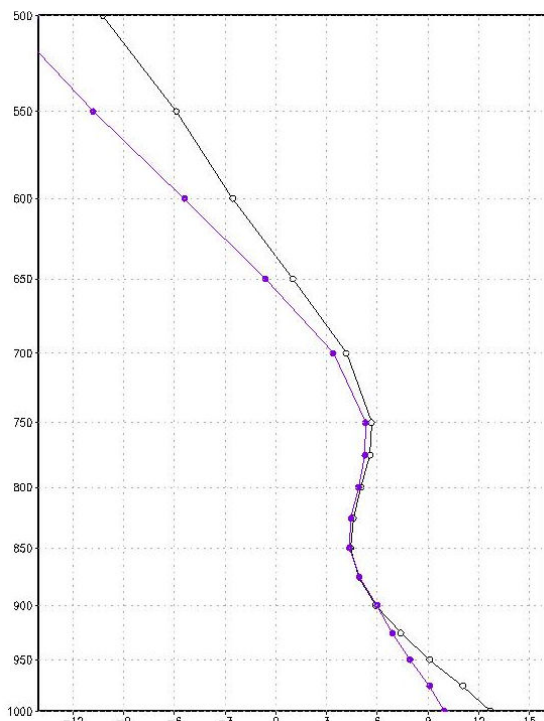


Figura 115– Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 21/07/2013 12Z

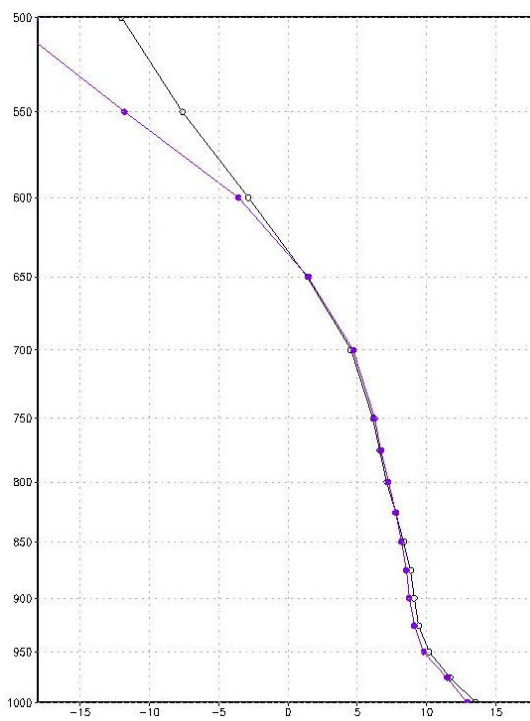


Figura 116 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 21/07/2013 12Z

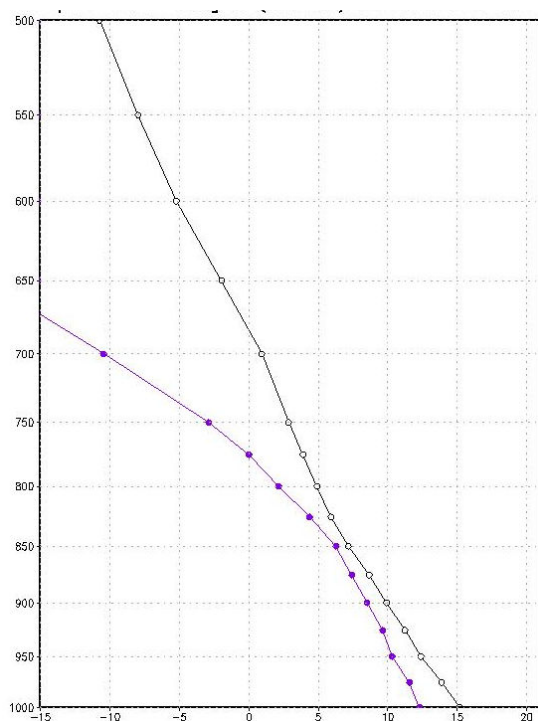


Figura 117 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 21/07/2013 12Z

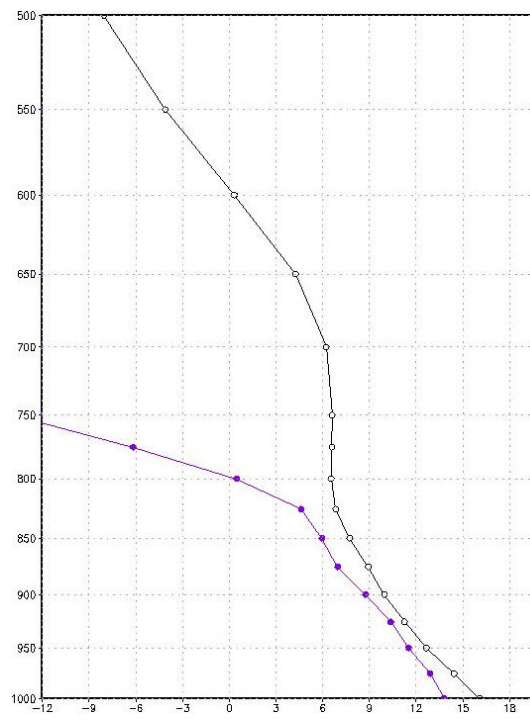


Figura 118 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAB para 27/07/2013 12Z

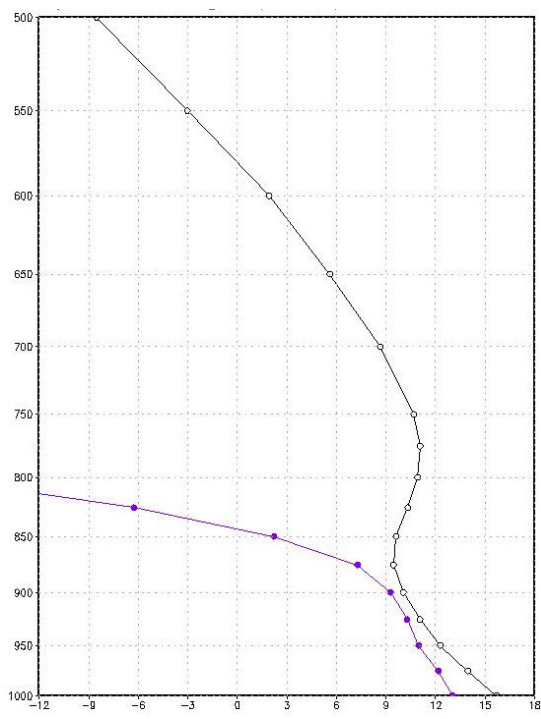


Figura 119 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 28/07/2013 12Z

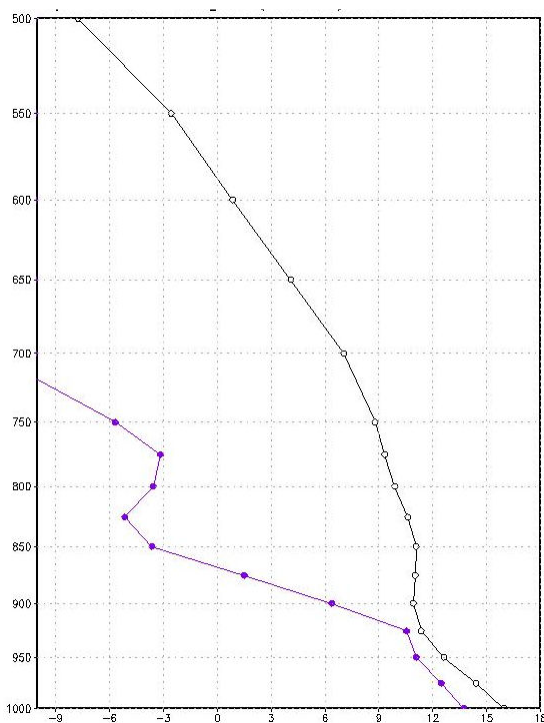


Figura 120 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 29/07/2013 12Z

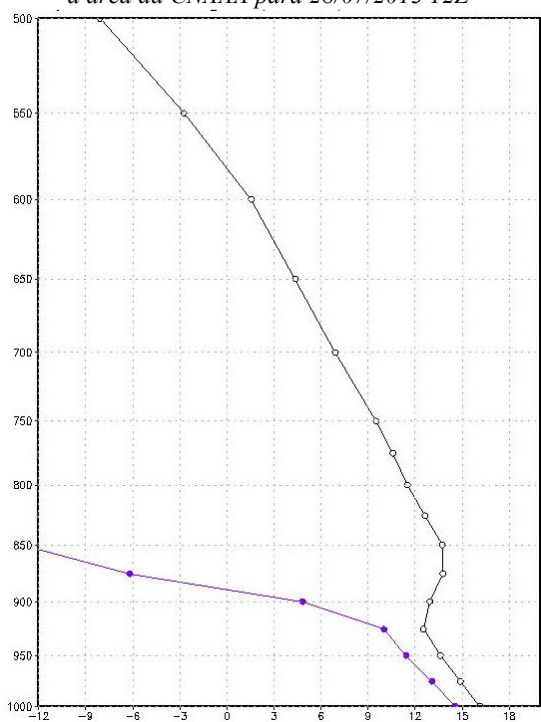


Figura 121 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 30/07/2013 12Z

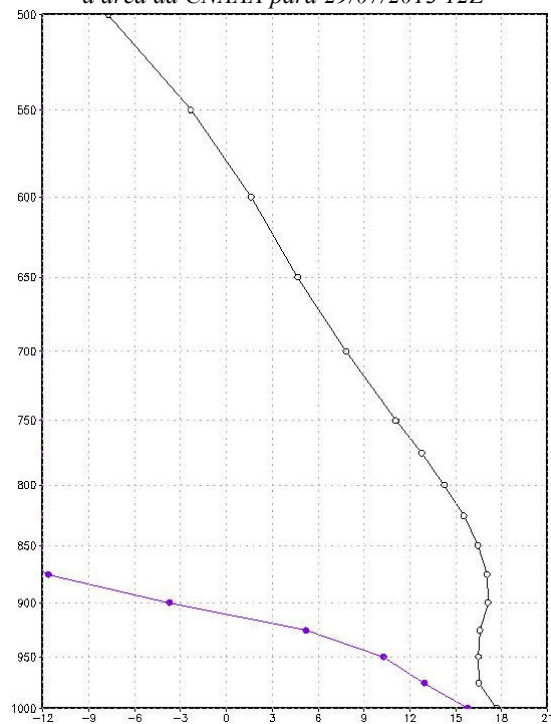


Figura 122 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para a área da CNAAA para 31/07/2013 12Z

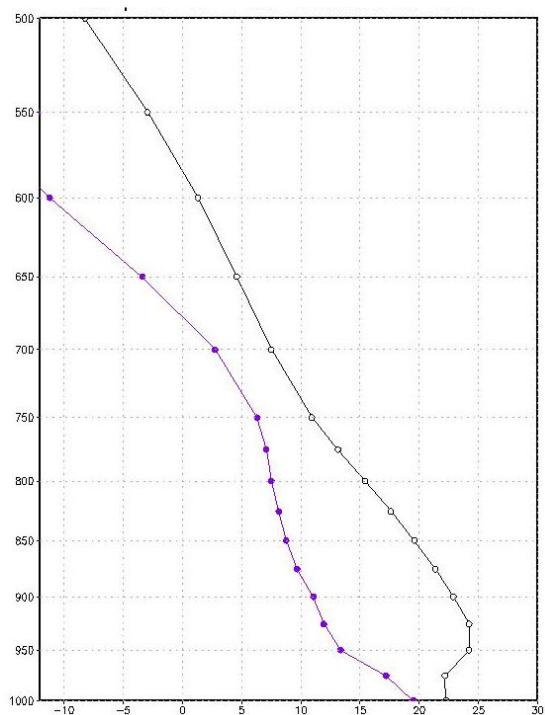


Figura 123 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 22/07/2013 12Z

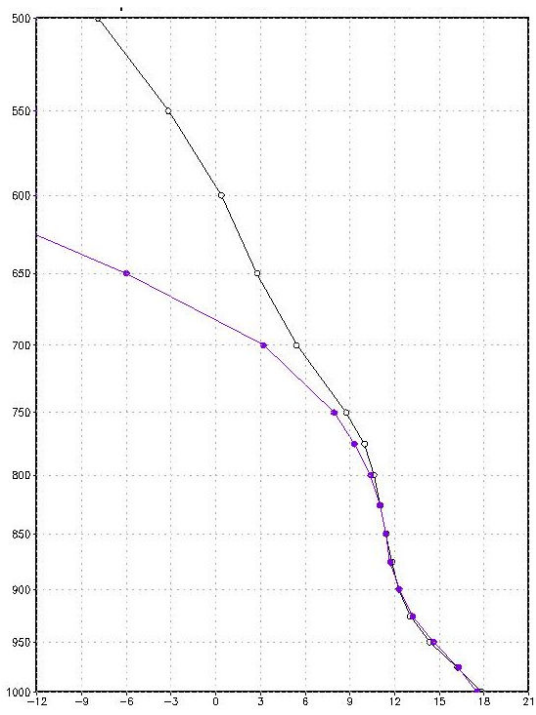


Figura 124 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 23/07/2013 12Z

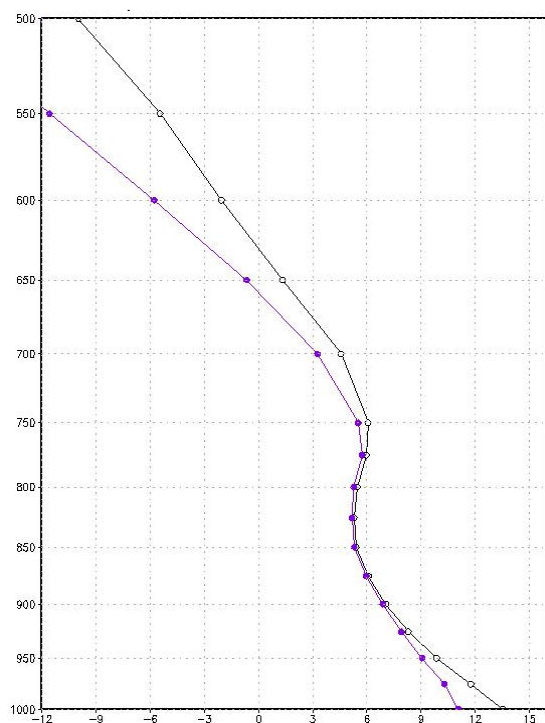


Figura 125 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 24/07/2013 12Z

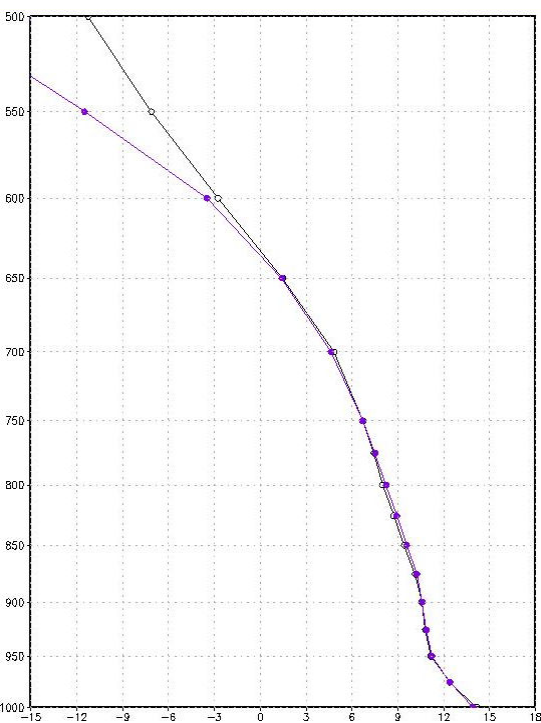


Figura 126 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 25/07/2013 12Z

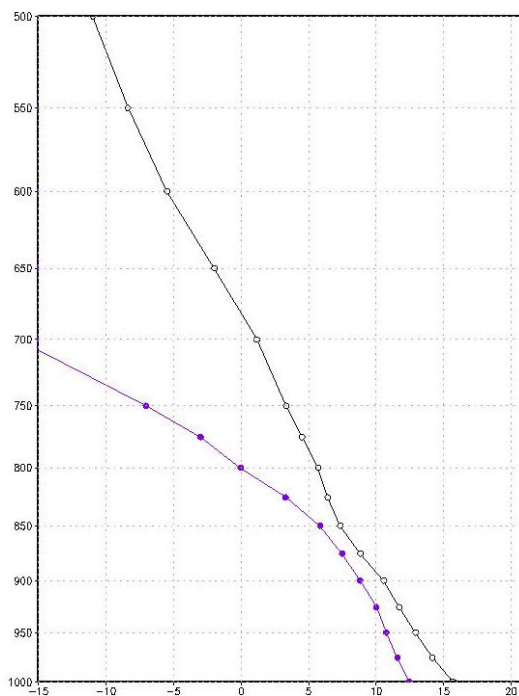


Figura 127 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 26/07/2013 12Z

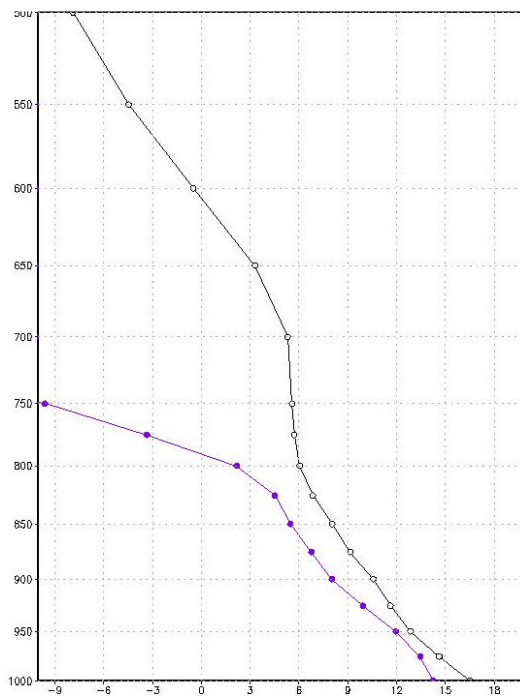


Figura 128 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 27/07/2013 12Z

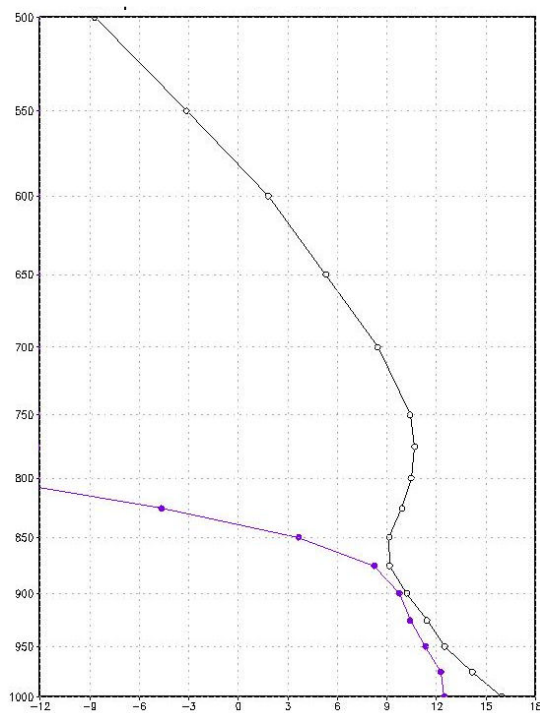


Figura 129 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 28/07/2013 12Z

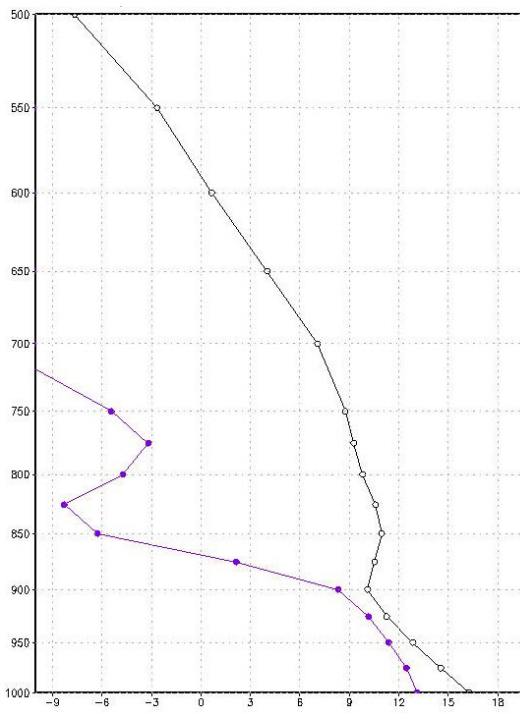


Figura 130 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 29/07/2013 12Z

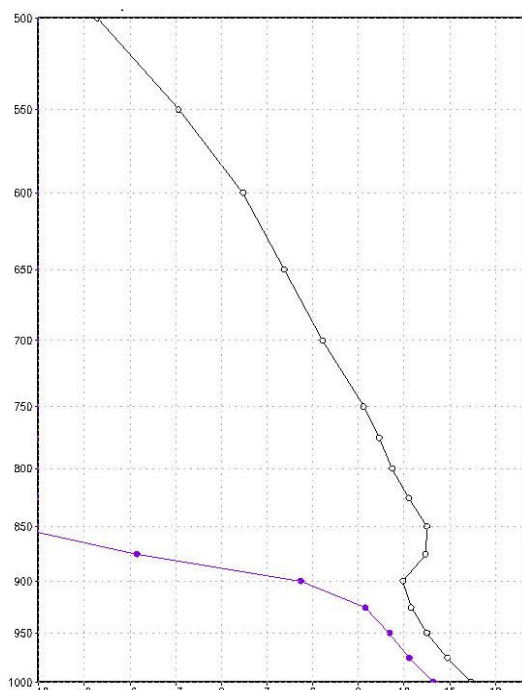


Figura 131 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 30/07/2013 12Z

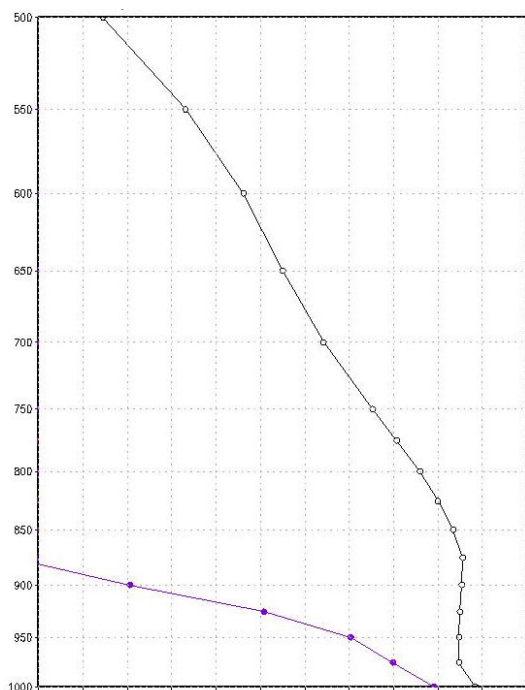


Figura 132 – Perfil vertical de temperatura do ar (°C) e de temperatura do ponto de orvalho (°C) para o Rio de Janeiro em 31/07/2013 12Z

Estudo das trajetórias para os episódios 1 e 2

A possibilidade de ocorrência de um acidente envolvendo Centrais nucleares em operação ou a serem instaladas é sempre significativa. A avaliação de acidentes nucleares como o de Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima nos permite adquirir conhecimentos principalmente em relação às emissões, transporte e dispersão de radionuclídeos uma vez que traços destes elementos foram detectados tanto próximos das áreas de emissões quanto em locais mais distantes. O acidente com a Central Nuclear de Fukushima serviu de base para diversos estudos de dispersão e trajetória da pluma de radionuclídeos o que nos permite observar alguns aspectos importantes ao se estudar um caso real acidental.

Modelos de transporte de mesoescala indicaram um movimento da pluma de poluentes para leste após a explosão da Unidade 2, entretanto, a direção observada da pluma foi de sul (Momoshima et al., 2012; RIU, 2011; Takemura et al., 2011). Entre os dias 15 e 16 de março de 2011 a trajetória da pluma direcionou-se para o sul e para o norte sendo registrada uma deposição densa de radionuclídeos pelas chuvas (Momoshima, 2012). Outro aspecto destacado por (RIU, 2011; Takemura et al., 2011), conforme

previsão dos modelos, foi o registro do transporte da pluma sobre o Pacífico Norte pelas correntes de leste atingindo os Estados Unidos. Embora, Momoshima et al. (2012) destaque que o transporte do Iodine-137 e o aumento da radioatividade à oeste do Japão tenham ocorrido por efeito das condições meteorológicas locais e não da circulação global.

Os problemas em acompanhar a trajetória da pluma de Fukushima através da modelagem em tempo real derivaram da desativação das estações meteorológicas e de monitoramento em consequência do tsunami (World Nuclear Association, 2015b); Katata et al., 2012). Enquanto, Korsakissok et al. (2013) aponta que decorrido um ano do acidente ainda existem incertezas quanto a aspectos relacionados à fonte (cinética de liberação, altura da fonte e composição isotópica), além das condições meteorológicas.

Por esta razão, torna-se necessário conhecer os principais mecanismos de circulação atmosférica nas diversas escalas e por consequência o regime de ventos predominantes para avaliar o transportes dos poluentes radioativos.

A fim de avaliar o comportamento da dispersão para o cenário acidental escolhido nesta dissertação foram obtidos gráficos com as respectivas trajetórias integradas para os 8 primeiros níveis eta e para os níveis restantes (de 9 a 39) apresentados de três em três horas, iniciando a partir da hora 3 UTC, bem como a evolução latitudinal e longitudinal em relação à altura (em metros) para o mesmo intervalo de tempo.

Destaca-se que para melhor visualização dos resultados, em todos os gráficos as concentrações são apresentadas em escala logarítmica, variando entre -13 e 5 ($1,0e^{-16}$ ppmv e 100 ppmv, respectivamente) tendo sido aplicada a seguinte função:

$$concentração_final = 1000 \times \log CO$$

sendo CO as concentrações originais resultantes das simulações com o WRF.

O uso da escala logarítmica permite, representar dados que apresentam uma larga gama de valores, facilitando cálculos e a construção de gráficos. Em geral, na escala logarítmica, baixos valores ou mesmo negativos correspondem à pequenas razões da grandeza inicial. Na física, é comum o uso destas funções, uma vez que certos fenômenos físicos que podem adquirir valores muito grandes, tornando-os menores.

Nos episódios estudados, os oito primeiros níveis eta correspondem, aproximamente, a altura da Camada Limite Atmosférica (CLA). Suas características se refletem na forma

como os poluentes se dispersam nesta região. Dependendo da fonte de emissão e dos aspectos físicos e químicos do poluente emitido, todo o volume da camada pode ser ocupado devido aos movimentos turbulento. Destaca-se que conhecer a altura da camada limite permite identificar o volume disponível para o transporte e dispersão (e seu padrão) dos poluentes.

Assim, uma primeira avaliação das trajetórias de dispersão, para ambos os episódios, indica que nas primeiras horas da liberação acidental, a pluma concentra-se no entorno do centro de emissão, sobre o continente. Com a evolução temporal, as plumas em cada episódio apresentam um comportamento diferente entre si, modulado pelas condições de tempo, principalmente pela ação do vento.

Analisando os resultados de ambos os episódios, verifica-se que os maiores valores de concentrações são observadas entre os 8 primeiros níveis eta (figura 133) quando comparadas aos níveis superiores (figura 134). Conforme destacado anteriormente, os valores negativos verificados em todos os gráficos estão associados à pequenos valores das concentrações iniciais. Além disso, verifica-se que os maiores valores de concentrações são registrados no episódio 2 (regime de tempo 3), variando entre -10 ($1,0e^{-13}$ ppmv), -4 ($1,0e^{-7}$ ppmv), 0 ($1,0e^{-3}$ ppmv) e 5 (100 ppmv). Entretanto, destaca-se que o objetivo principal é avaliar o transporte, sendo esta uma das razões do uso do traçador passivo, sendo assim, os valores das concentrações não estão em foco. Ressalta-se que nas simulações com o WRF não foi considerada a precipitação. Para o episódio 2, que reflete a passagem de sistemas frontais, é um fator fundamental, principalmente na deposição destes poluentes. Tal fato, pode ser o responsável pelas maiores concentrações registradas no episódio 2.

Avaliação da trajetória da pluma para o episódio 1

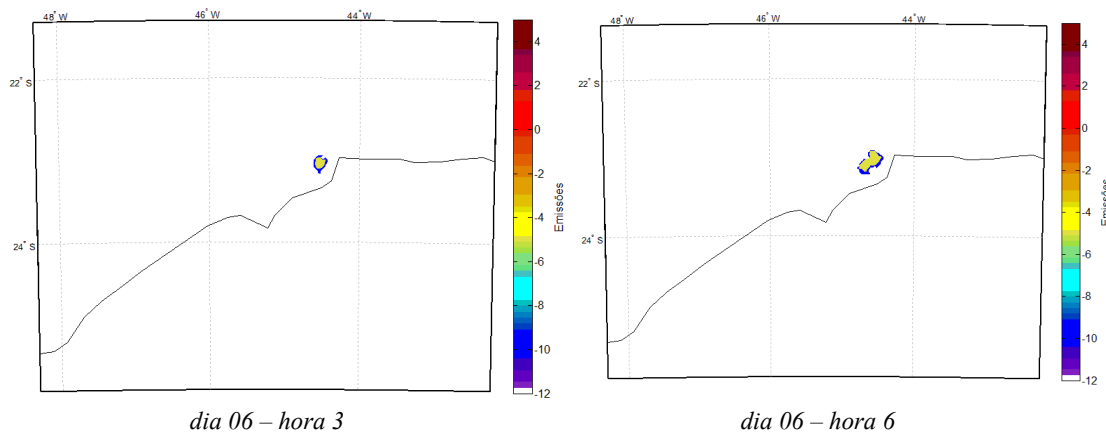
Na pluma integrada para os oito níveis eta iniciais (figura 133) verifica-se que no começo das emissões no dia 06 (hora 3), a pluma é empurrada para o interior do continente por ventos de quadrante sul, com uma inversão neste cenário na hora 9 cuja direção indica a atuação de ventos de nordeste. Após este horário, a pluma apresenta um deslocamento guiada por ventos de quadrante sul até a hora 21. A partir do dia 6 hora 24 verifica-se um movimento para as direções oeste e sul seguindo os ventos de leste, conforme esperado

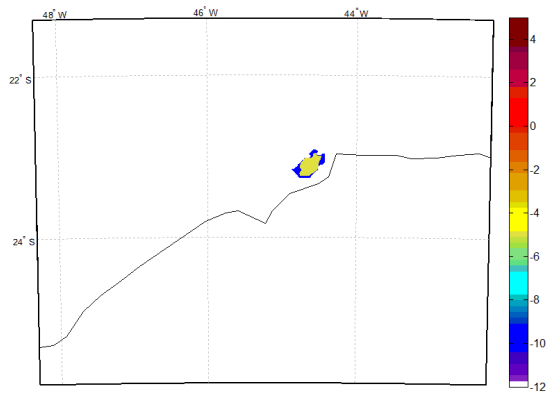
para o cenário de atuação do ASAS. Um núcleo de máximas concentrações é mantido no entorno do ponto de liberação, variando entre -10 ($1,0e^{-13}$ ppmv) e -4 ($1,0e^{-7}$ ppmv).

Ao longo dos dias, a dispersão se concentra entre os limites 46°W , 44°W e 22°S , 24°S , sempre sobre o continente. A pluma atinge o oceano no dia 08 após a hora 6 e somente ultrapassa os limites supracitados na hora 12 do dia 08.

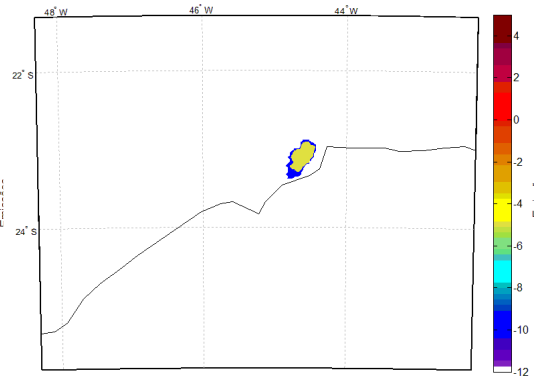
Destaca-se que as plumas para os níveis acima da camada limite apresentaram concentrações muito inferiores quando comparadas a dos 8 primeiros níveis et. Em vários horários, não houve registro da trajetória da pluma, o que indica que a pluma se manteve dentro da CLA. Tal condição também é observada nas figuras 135 e 136.

As figuras 49 e 50 com os campos de ventos para a CNAAB e para o Rio indicam a predominância de quadrante norte, principalmente nordeste, condizente com a condição de tempo sobre a influência do ASAS. Entretanto, nos instantes iniciais observa-se ventos de sul que influenciam nas trajetórias da pluma, possivelmente devido ao efeito da brisa. Quanto ao perfil vertical de temperatura (curva em preto) e de temperatura de ponto de orvalho (roxo) para a CNAAB e para a cidade do Rio de Janeiro (figuras 69 a 80), neste período observa-se que não houve inversões de temperatura. A proximidade entre as curvas de T e Td indicam a presença de umidade, principalmente em baixos níveis (por exemplo, nas figuras 75 e 76) enquanto em níveis médios verifica-se ar mais seco. Em nenhum dos dias é verificado o cruzamento entre as mesmas o que indica que não houve precipitação sobre a região do estado do Rio de Janeiro. Nessas condições de perfil vertical de temperatura, o ar mais quente encontra-se próximo à superfície com o ar mais frio acima, o que ajuda na dispersão local dos poluentes.

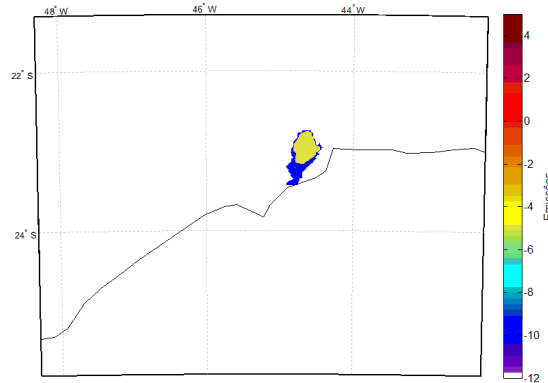




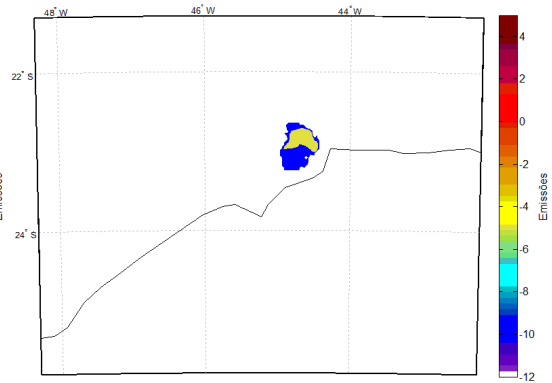
dia 06 – hora 9



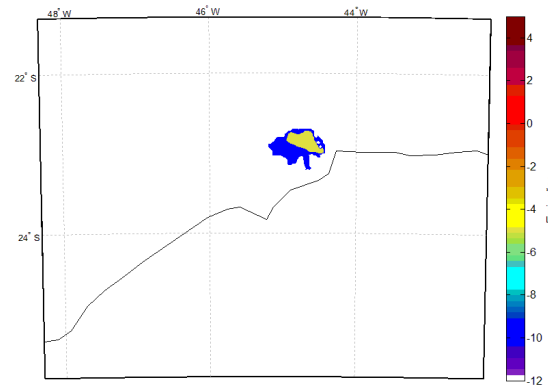
dia 06 – hora 12



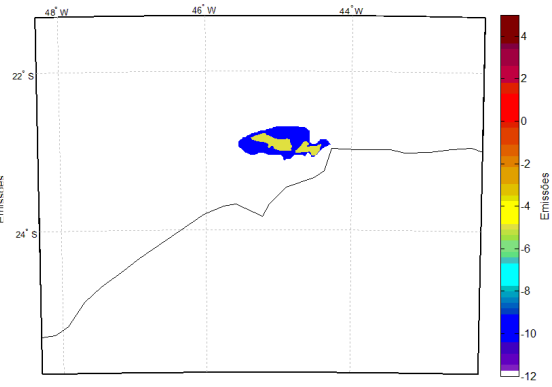
dia 06 – hora 15



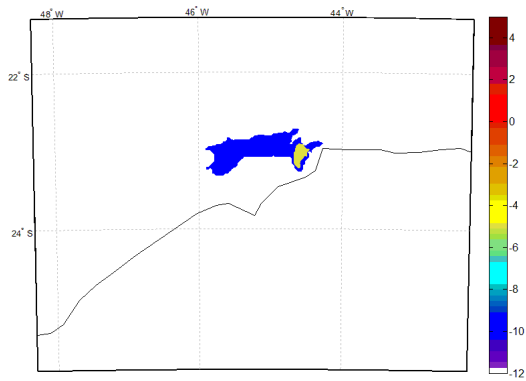
dia 06 – hora 18



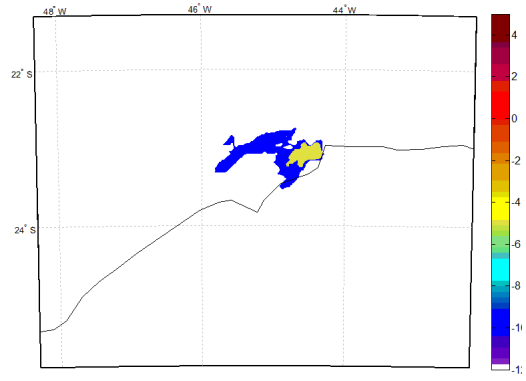
dia 06 – hora 21



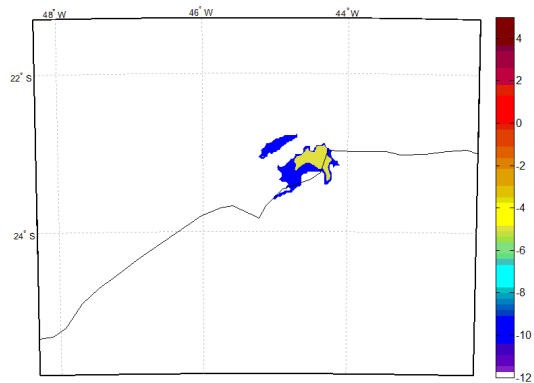
dia 06 – hora 24



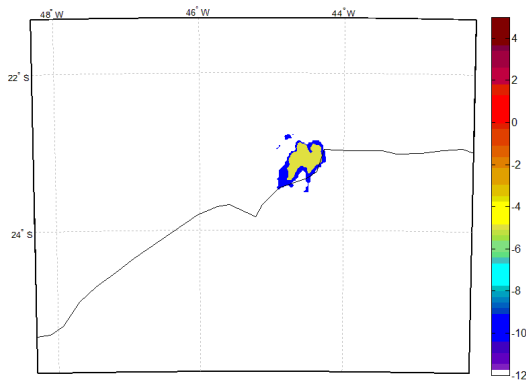
dia 07 – hora 3



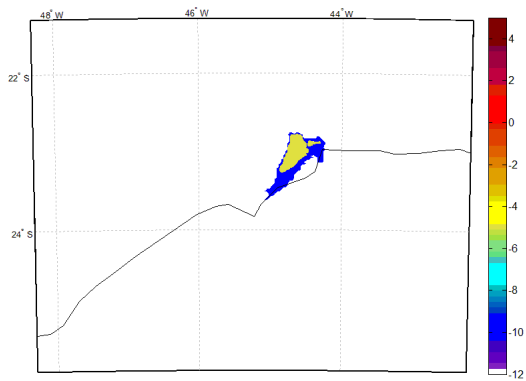
dia 07 – hora 6



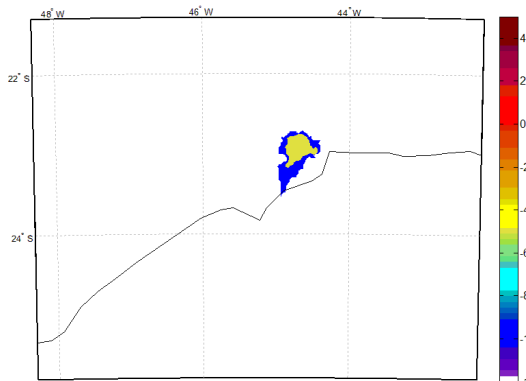
dia 07 – hora 9



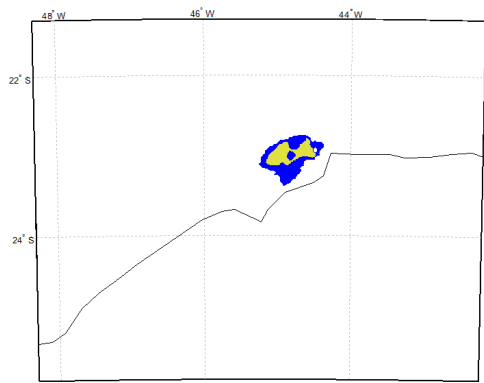
dia 07 – hora 12



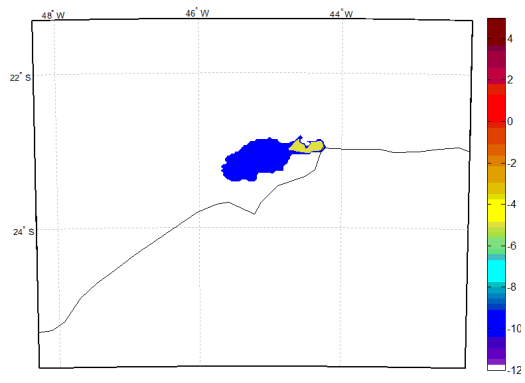
dia 07 – hora 15



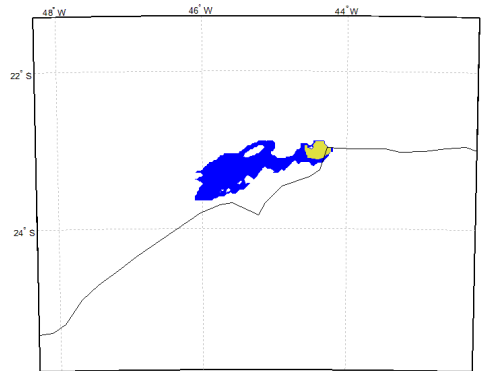
dia 07 – hora 18



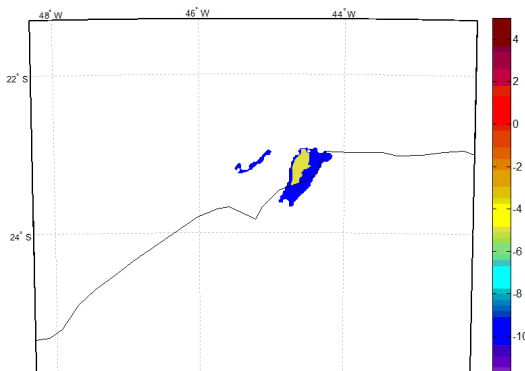
dia 07 – hora 21



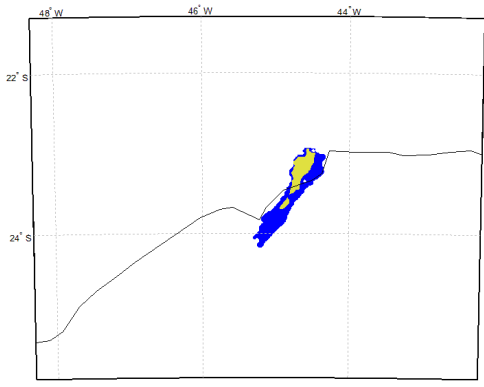
dia 07 – hora 24



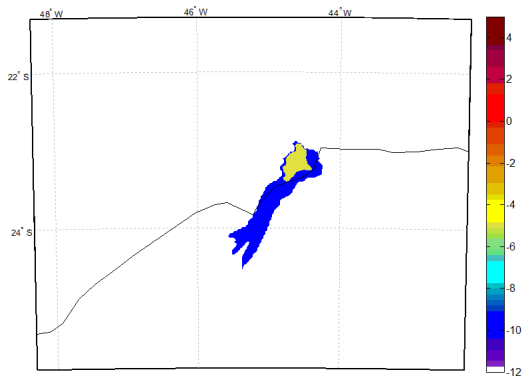
dia 08 – hora 3



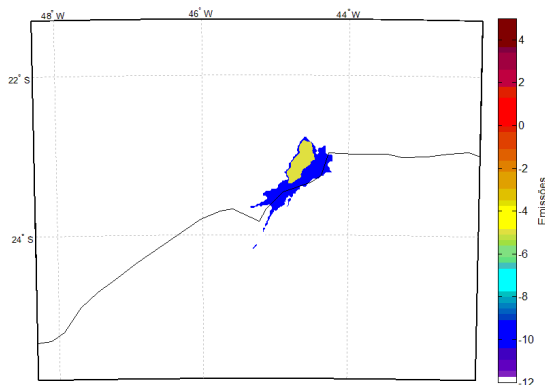
dia 08 – hora 6



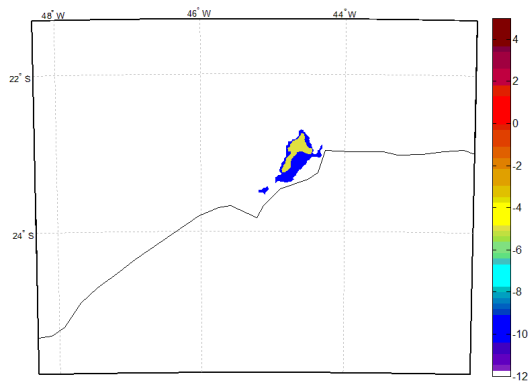
dia 08 – hora 9



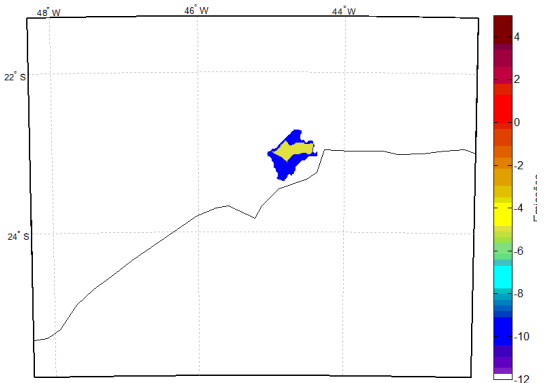
dia 08 – hora 12



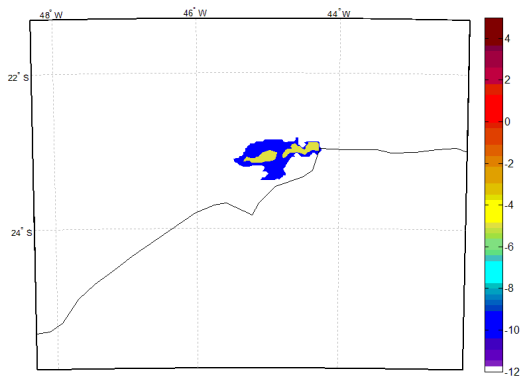
dia 08 – hora 15



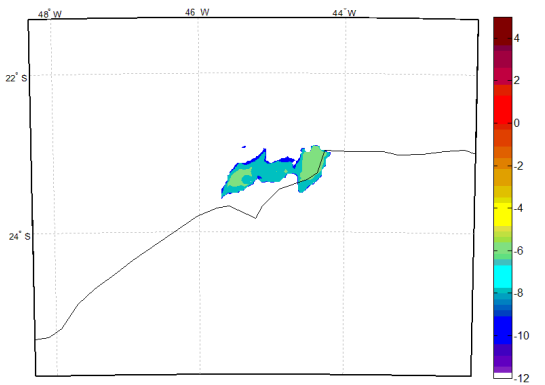
dia 08 – hora 18



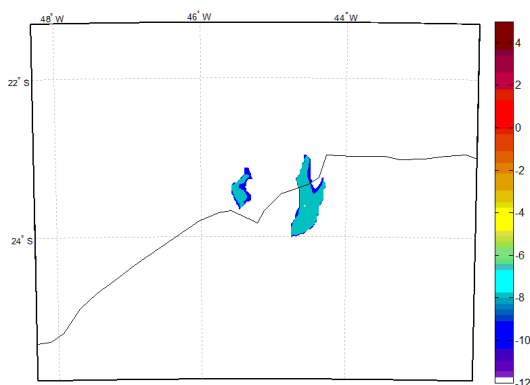
dia 08 – hora 21



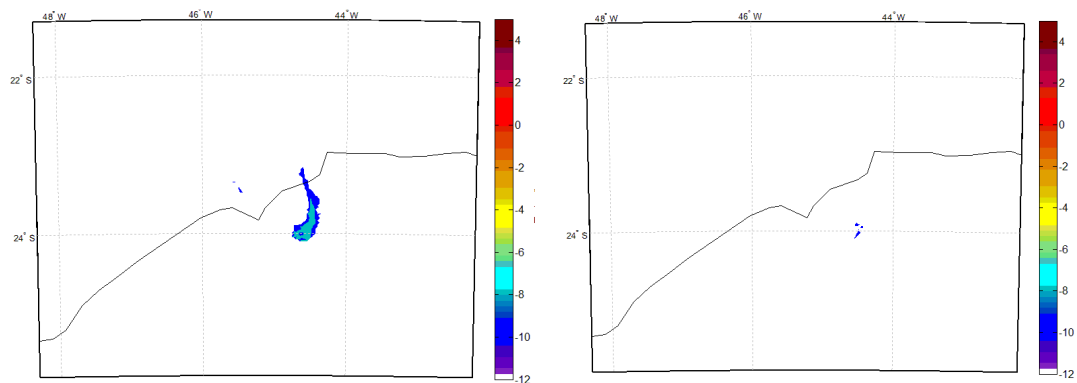
dia 08 – hora 24



dia 09 – hora 3

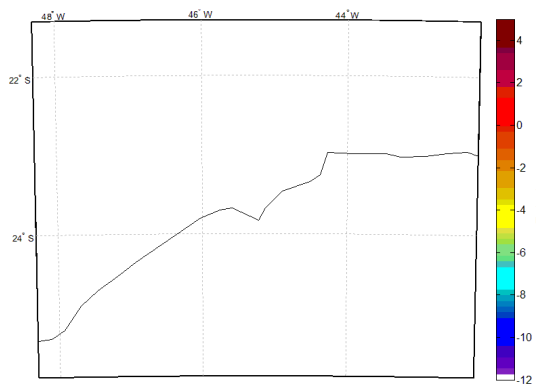


dia 09 – hora 6



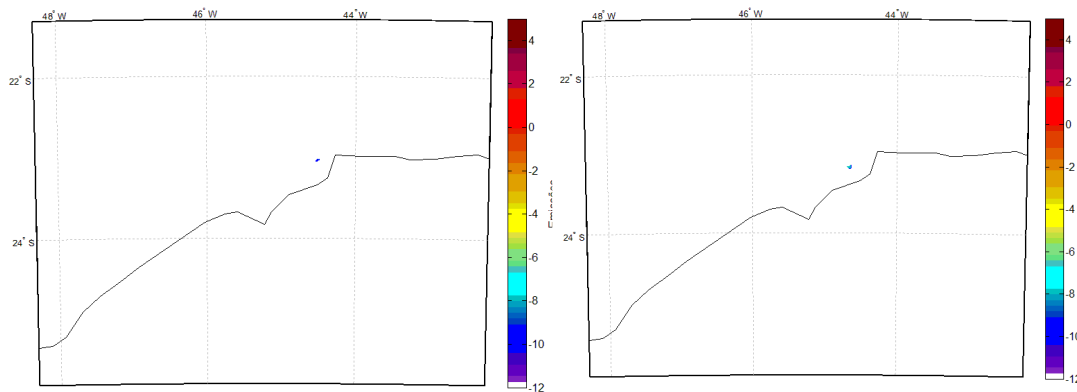
dia 09 – hora 9

dia 09 – hora 12



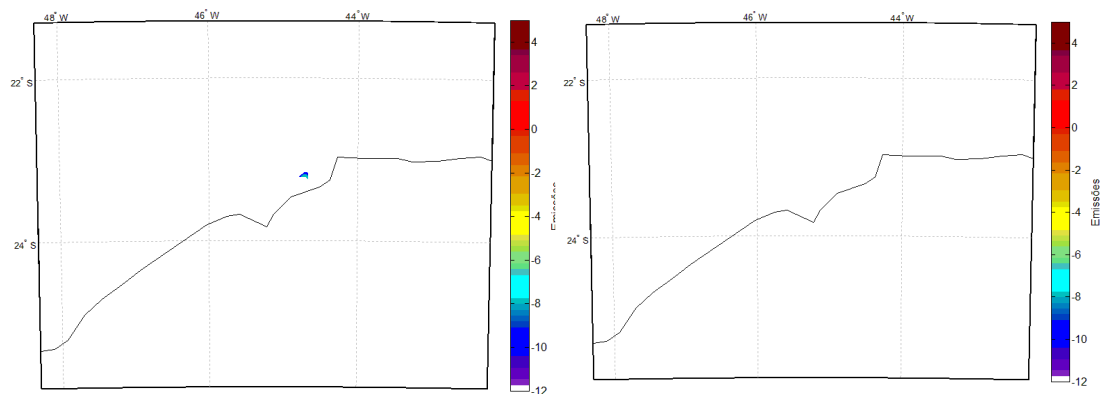
dia 09 – hora 15

Figura 133 – Evolução temporal da pluma de dispersão com as concentrações integradas para os 8 primeiros níveis eta com intervalo de 3 horas.



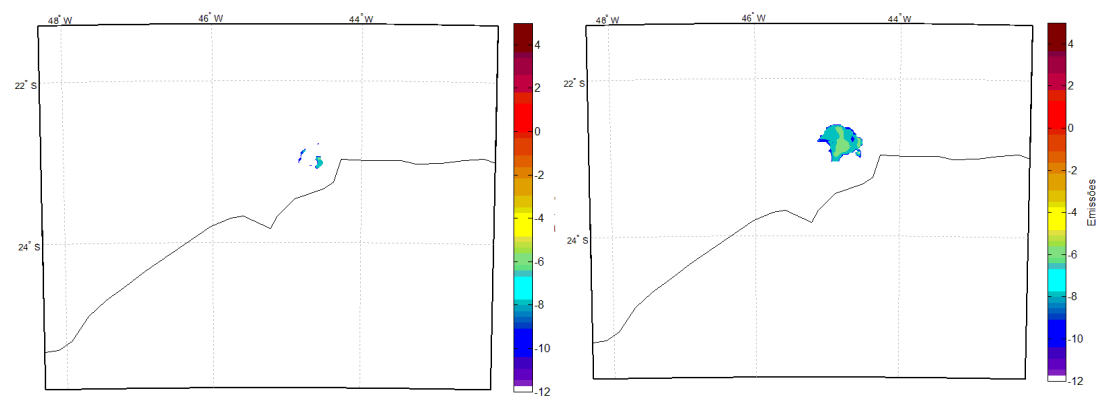
dia 06 – hora 3

dia 06 – hora 6



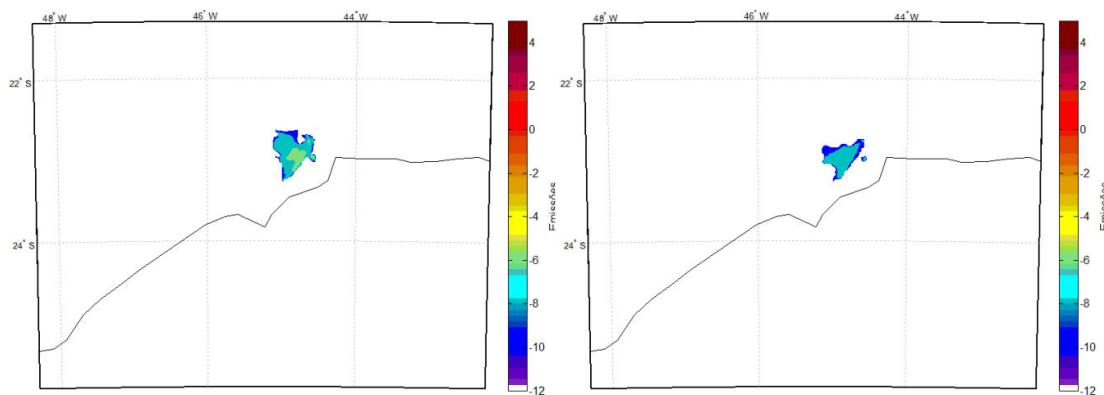
dia 06 – hora 9

dia 06 – hora 12



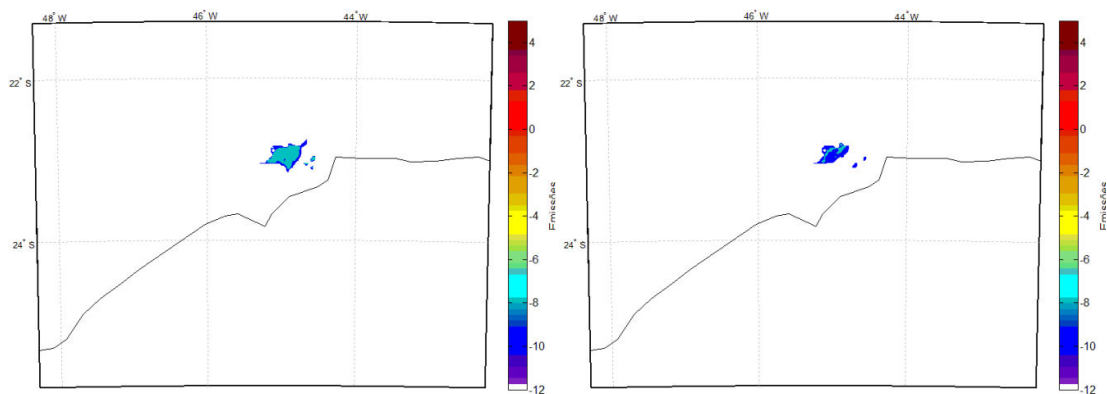
dia 06 – hora 15

dia 06 – hora 18



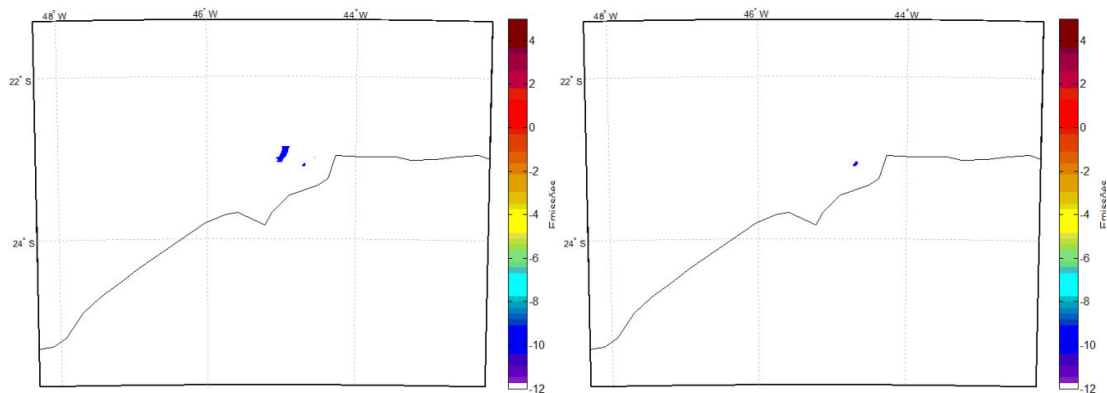
dia 06 – hora 21

dia 06 – hora 24



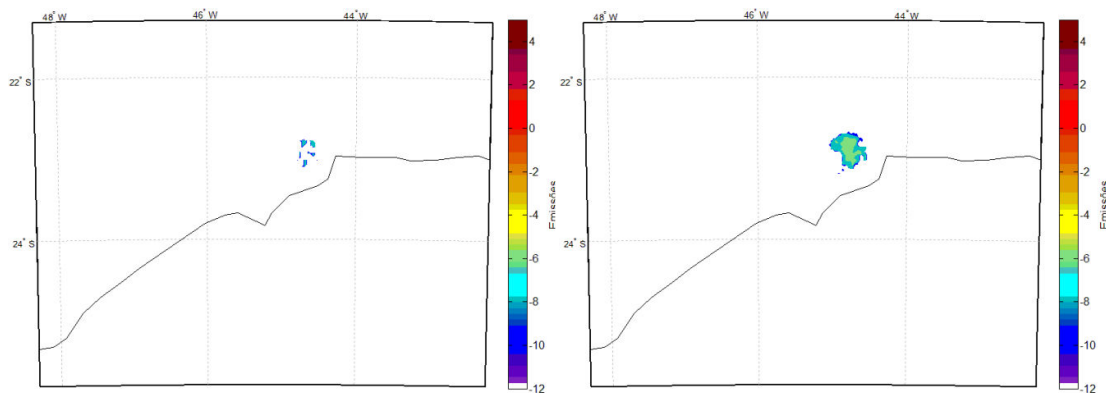
dia 07 – hora 3

dia 07 – hora 6



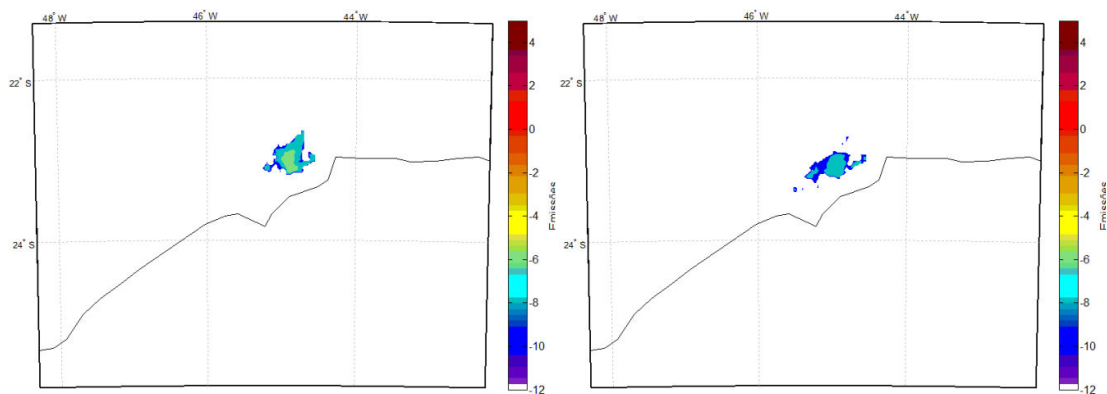
dia 07 – hora 9

dia 07 – hora 12



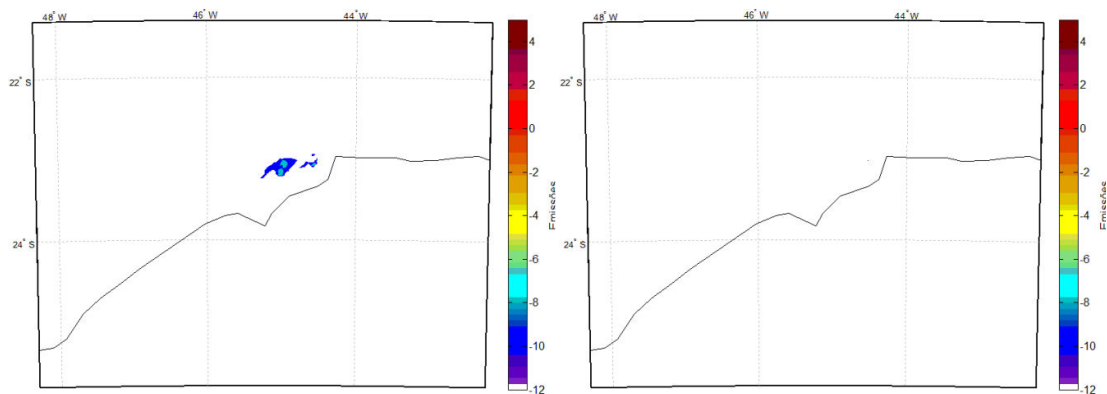
dia 07 – hora 15

dia 07 – hora 18



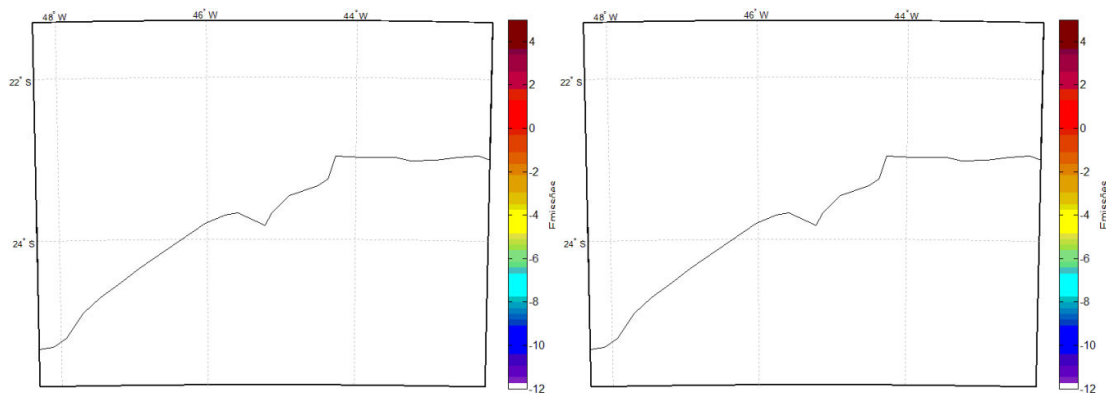
dia 07 – hora 21

dia 07 – hora 24



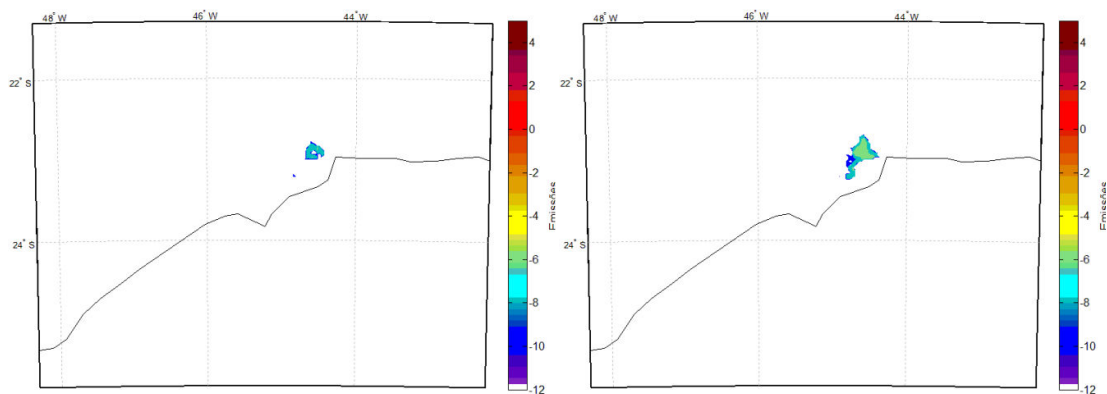
dia 08 – hora 3

dia 08 – hora 6



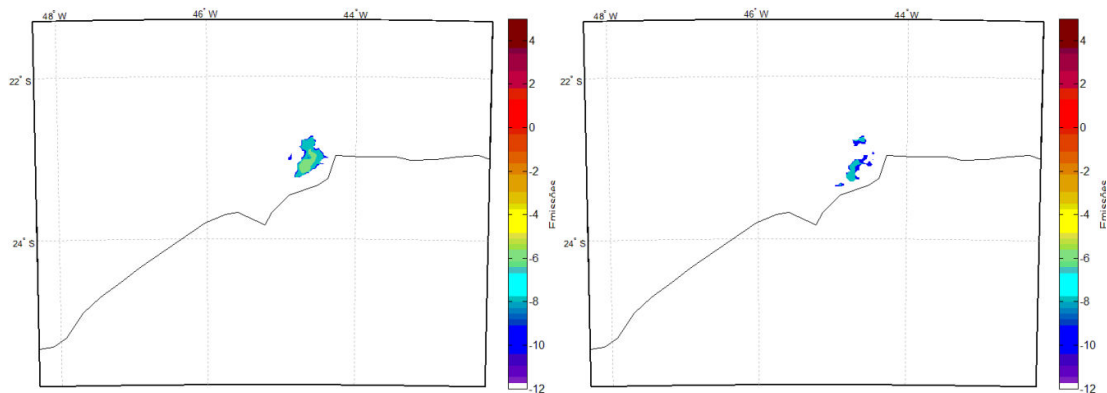
dia 08 – hora 9

dia 08 – hora 12



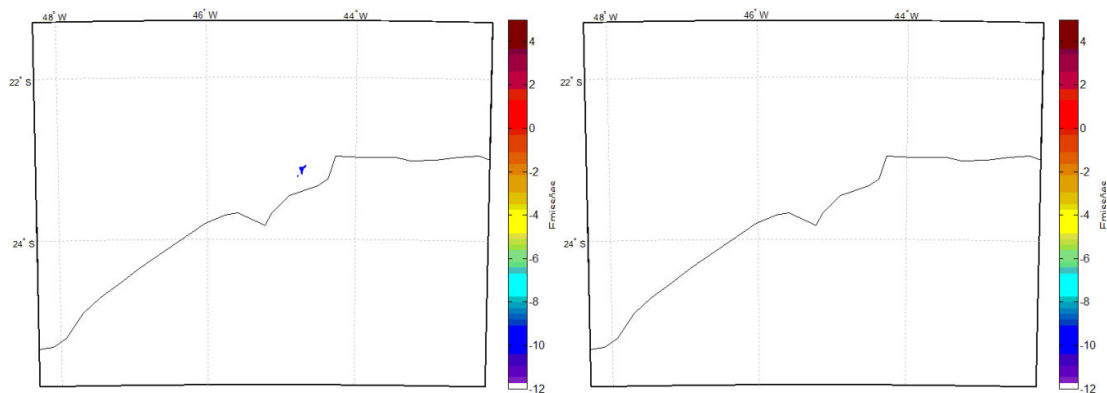
dia 08 – hora 15

dia 08 – hora 18



dia 08 – hora 21

dia 08 – hora 24



dia 09 – hora 3

dia 09 – hora 6

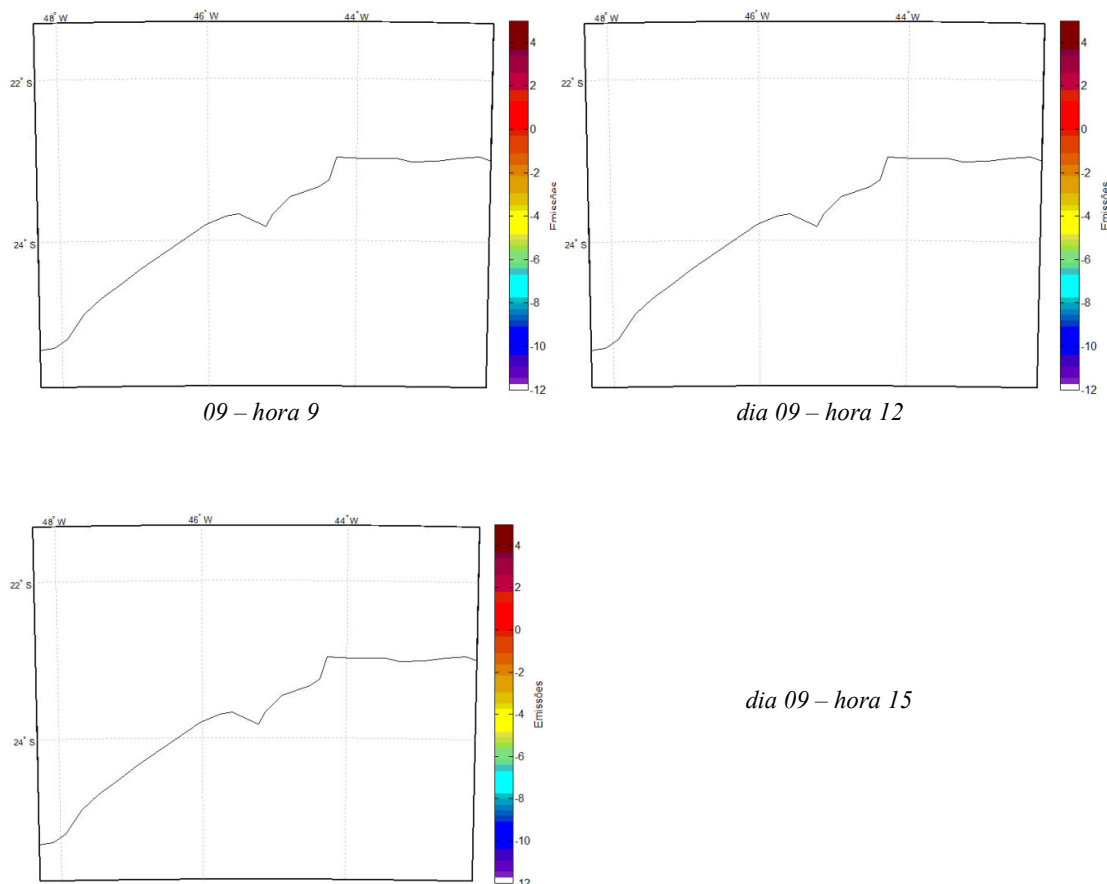


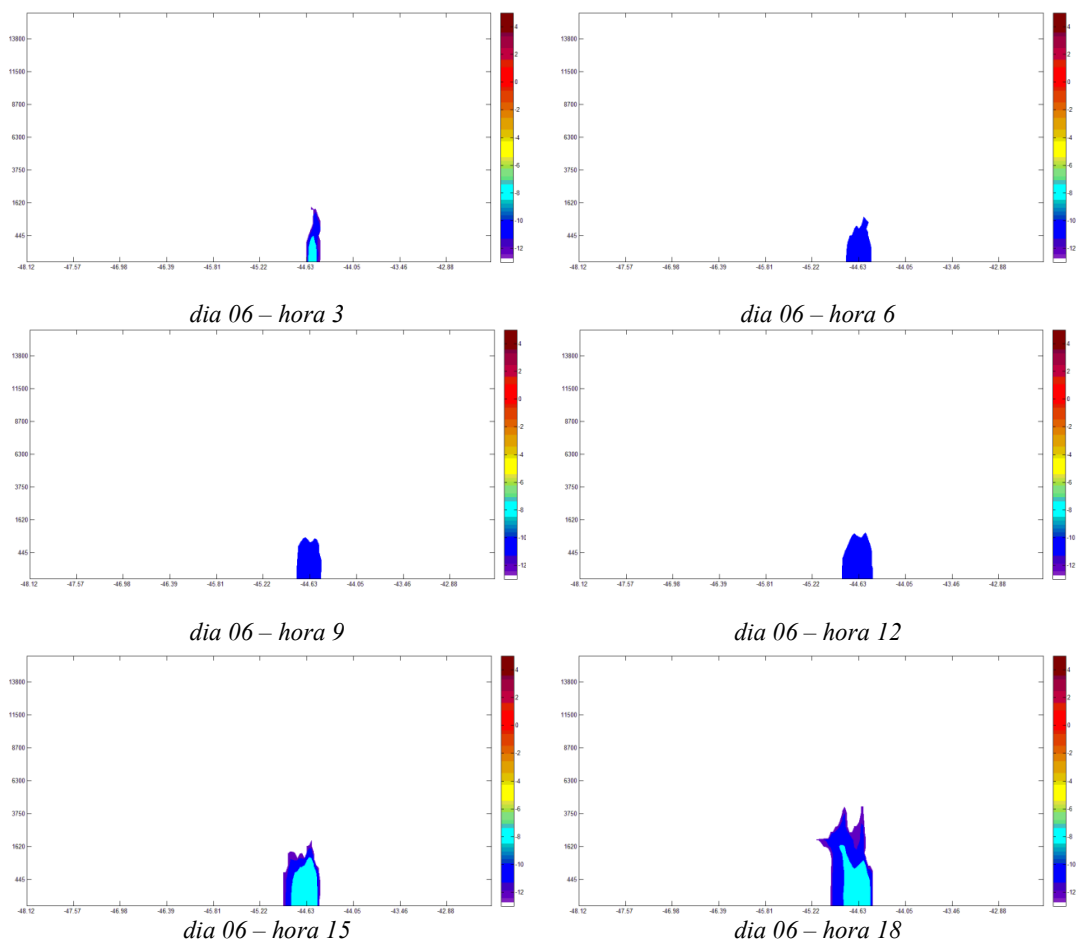
Figura 134 – Evolução temporal da pluma de dispersão com as concentrações integradas para os níveis eta 9 a 39 com intervalo de 3 horas.

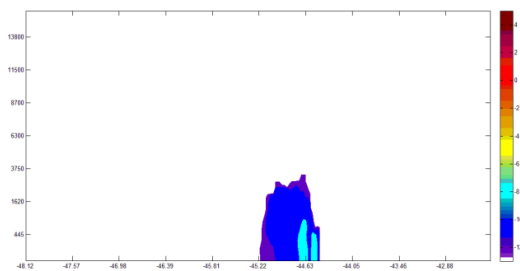
A figura 135 representa a variação longitudinal média, durante o período de simulação, em relação a altura (e níveis eta) entre as latitudes -23.75° e -22.4° . Verifica-se que a pluma varia, durante todo o período analisado, entre as longitudes 45.8°W e 44.05°W , sendo o centro das emissões aos 44.4°W . Em todas as imagens, nota-se que as maiores concentrações são registradas no entorno desta longitude. Assim, tendo como referência esta faixa, observa-se que ao longo do tempo a pluma se expande para a direção oeste. Esta dinâmica de deslocamento indica a influência dos ventos quadrante norte (figuras 49 e 59) resultantes da circulação do ASAS.

Em relação à vertical, constata-se que a pluma, na maior parte do período, está restrita aos 10 primeiros níveis eta (faixa de 1620m nos gráficos), não ultrapassando os 3000 m, o que corresponde ao nível eta 15. A exceção é observada no dia 7 na horas 21 e 24 onde a pluma atinge o nível eta 25. Ressalta-se ainda que as maiores concentrações são

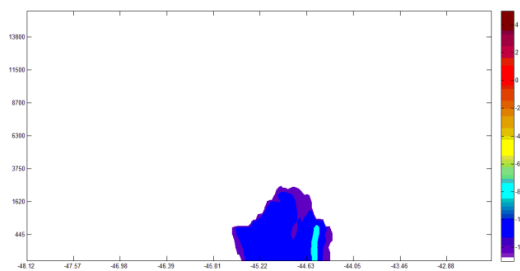
registradas dentro da CLA, valendo aproximadamente -8 ($1,0e^{-11}$ ppmv) próximo ao ponto de liberação.

A figura 136 mostra a variação latitudinal média centrada entre os 45.22°W e 43.75°W em relação a altura (e níveis eta), na qual se pode observar o deslocamento da pluma na direção norte-sul. De forma semelhante às variações longitudinais há uma faixa de concentrações máximas ao redor dos 23°S . Focando nesta faixa podemos observar que inicialmente a pluma está centrada sobre o ponto de liberação, deslocando-se posteriormente para sul (à direita das imagens), sendo mais evidente a partir do dia 06 hora 12. Em relação à altura, a pluma se mantém dentro dos limites da CLA, na maioria dos horários estudados. Em alguns horários, a pluma atinge o nível eta 15 e no dia 7, o nível 20. Nos níveis associados à CLA são registrados os maiores valores de concentrações, aproximadamente -8 ($1,0e^{-11}$ ppmv).

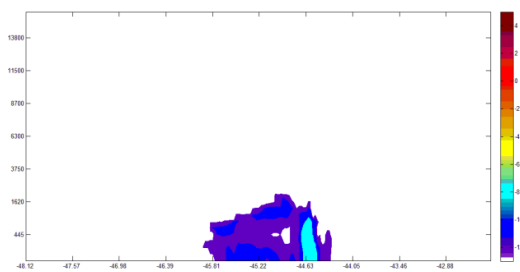




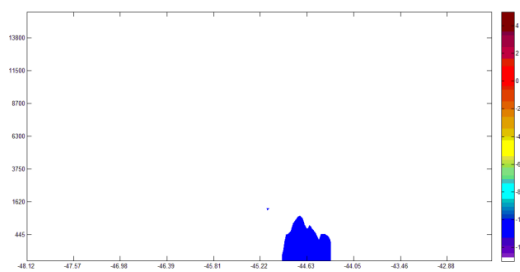
dia 06 – hora 21



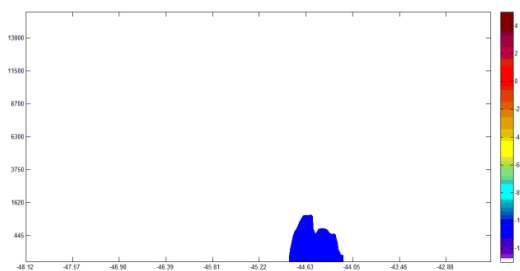
dia 06 – hora 24



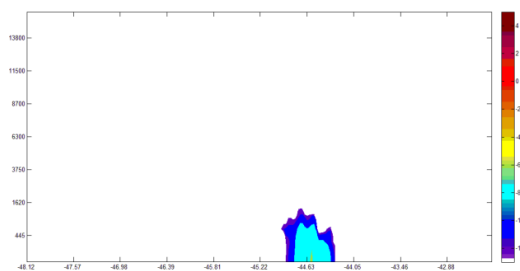
dia 07 – hora 3



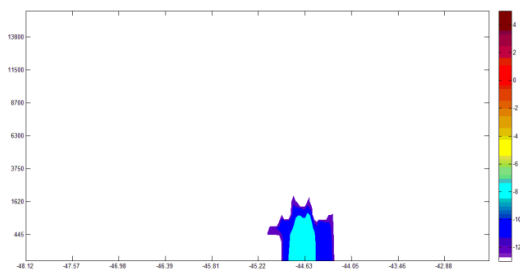
dia 07 – hora 6



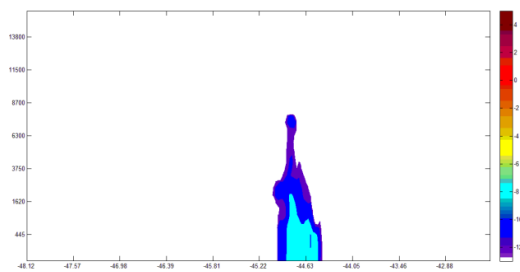
dia 07 – hora 9



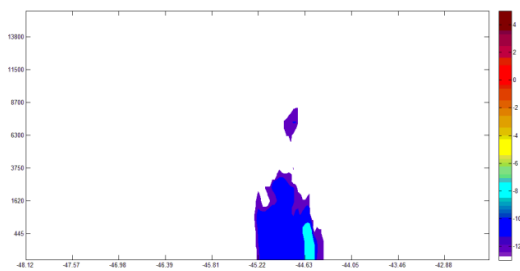
dia 07 – hora 12



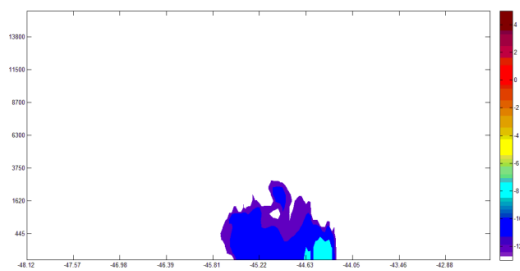
dia 07 – hora 15



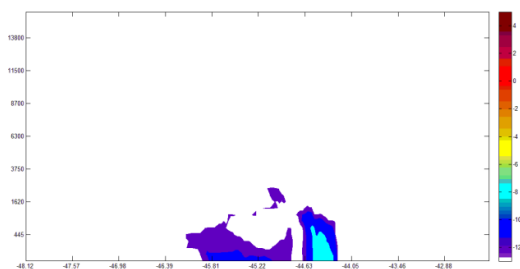
dia 07 – hora 18



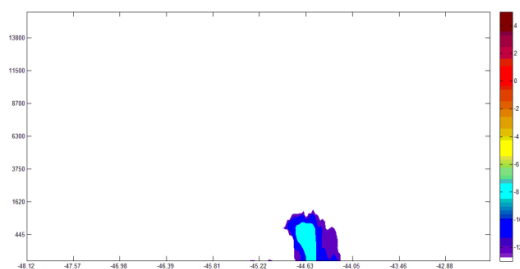
dia 07 – hora 21



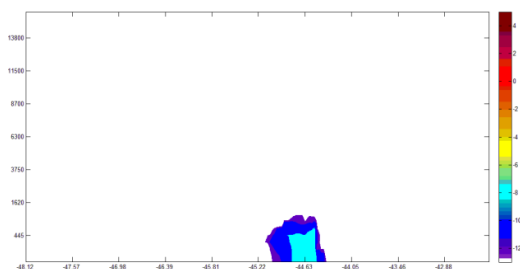
dia 07 – hora 24



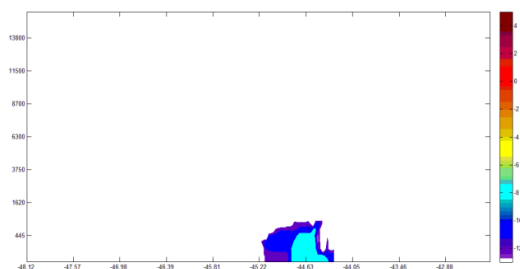
dia 08 – hora 3



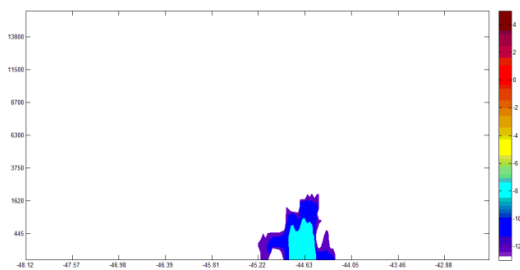
dia 08 – hora 6



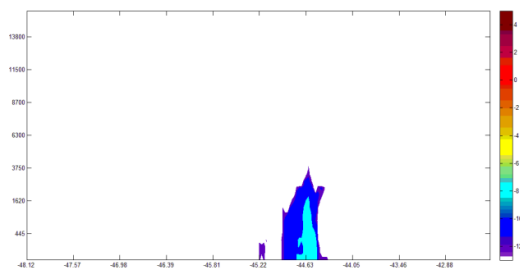
dia 08 – hora 9



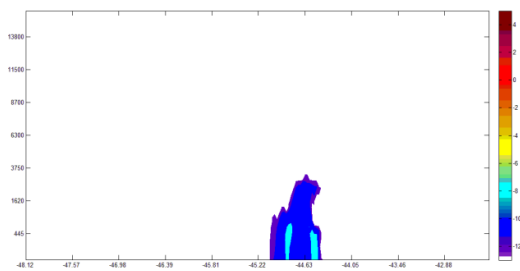
dia 08 – hora 12



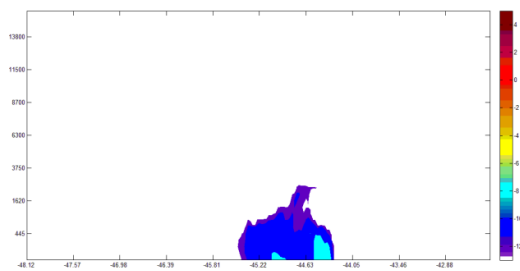
dia 08 – hora 15



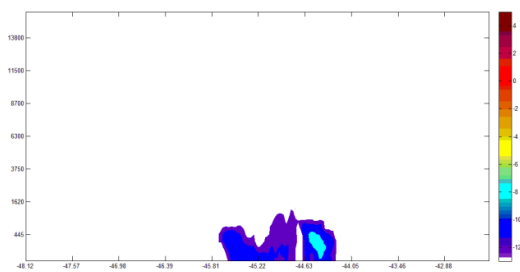
dia 08 – hora 18



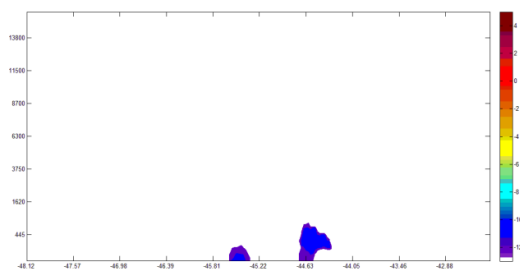
dia 08 – hora 21



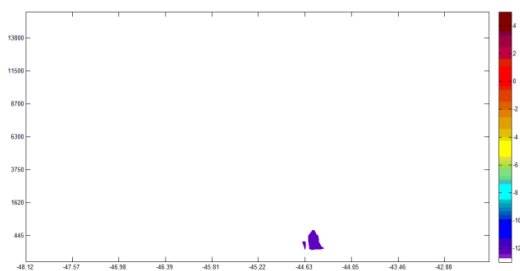
dia 08 – hora 24



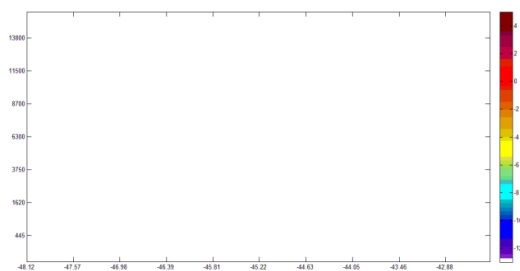
dia 09 – hora 3



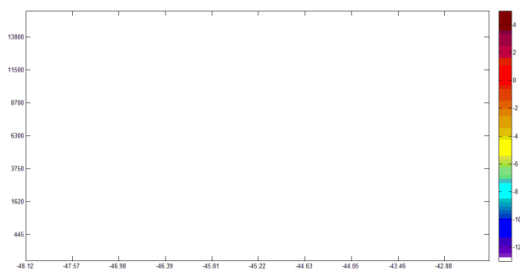
dia 09 – hora 6



dia 09 – hora 9

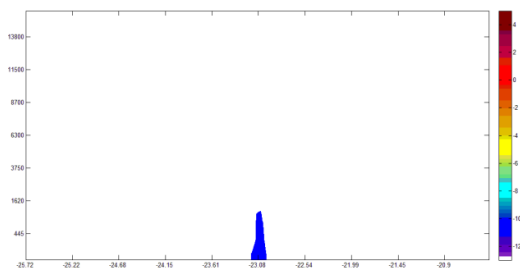


dia 09 – hora 12

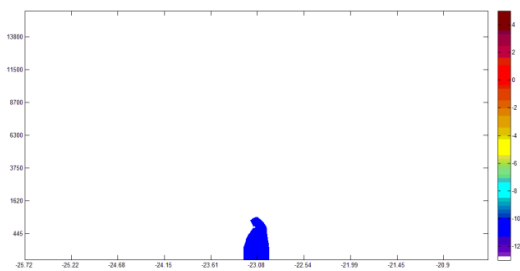


dia 09 – hora 15

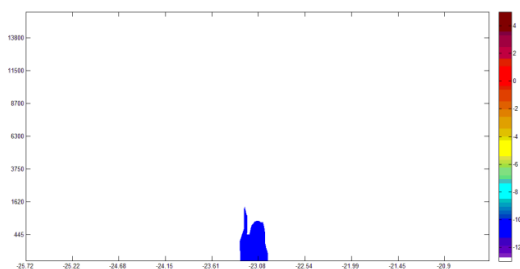
Figura 135 - Variação longitudinal média das concentrações com intervalo de 3 horas



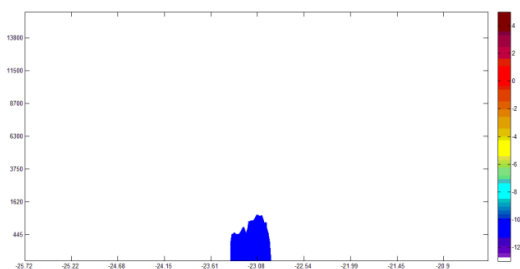
dia 06 – hora 3



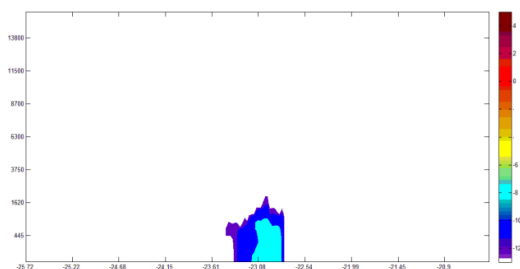
dia 06 – hora 6



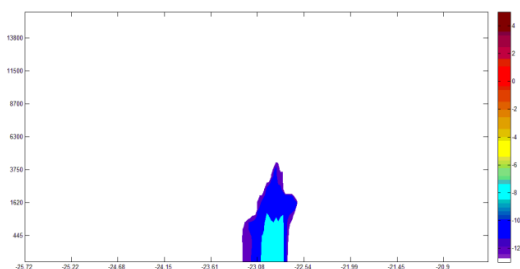
dia 06 – hora 9



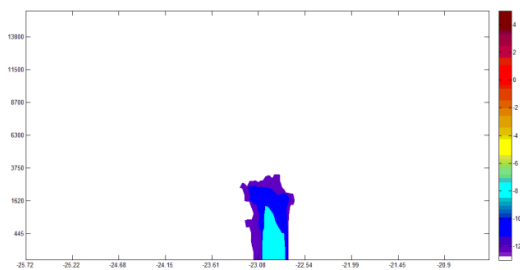
dia 06 – hora 12



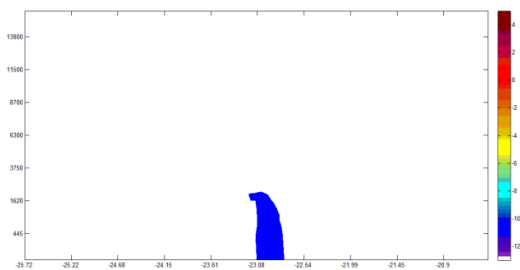
dia 06 – hora 15



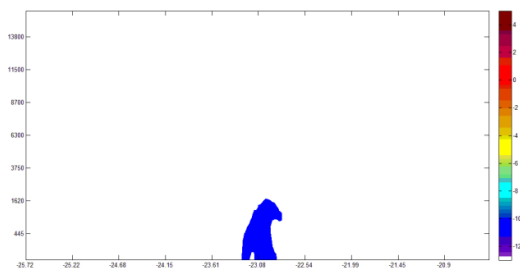
dia 06 – hora 18



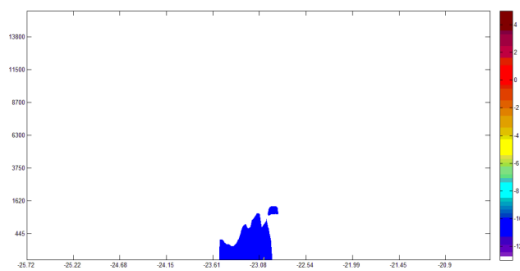
dia 06 – hora 21



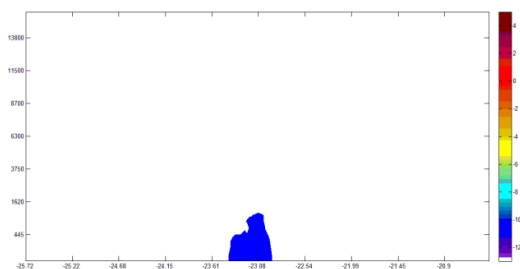
dia 06 – hora 24



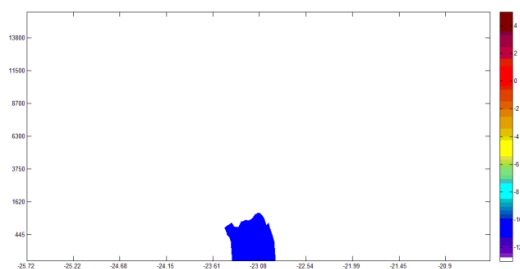
dia 07 – hora 3



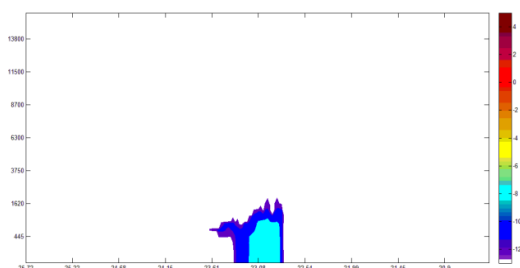
dia 07 – hora 6



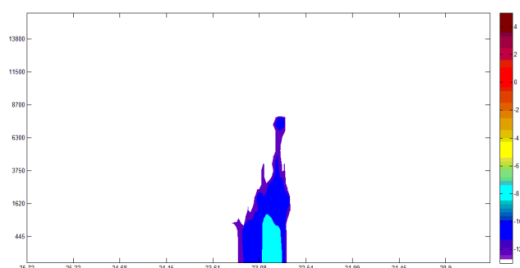
dia 07 – hora 9



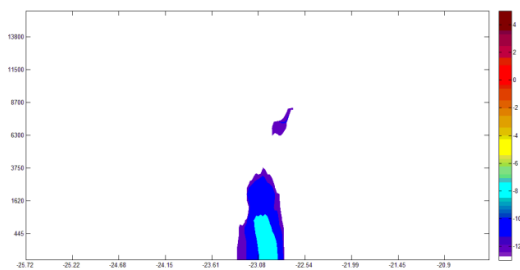
dia 07 – hora 12



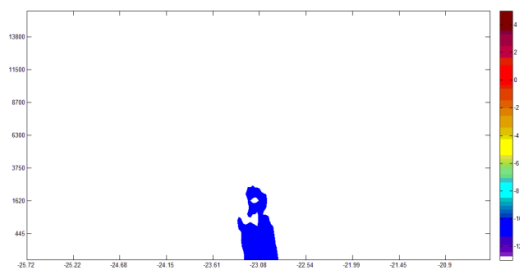
dia 07 – hora 15



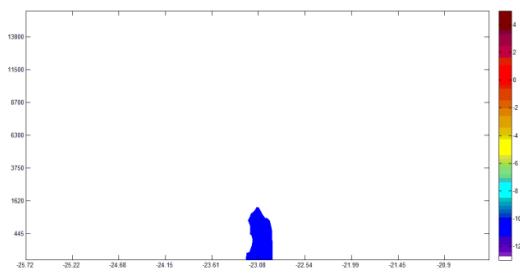
dia 07 – hora 18



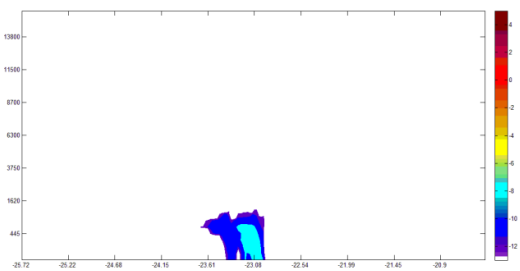
dia 07 – hora 21



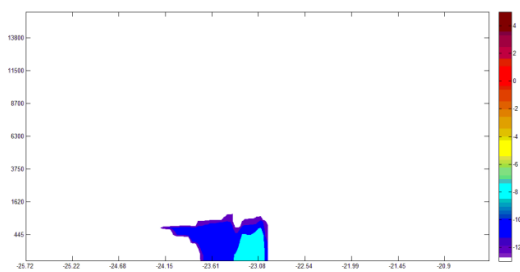
dia 07 – hora 24



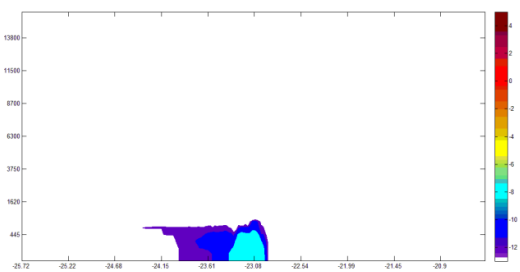
dia 08 – hora 3



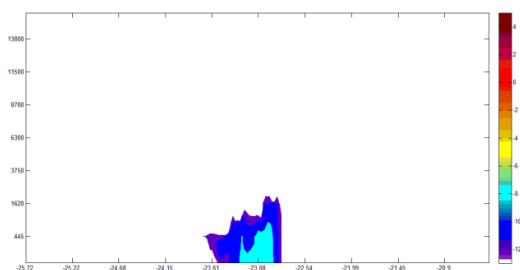
dia 08 – hora 6



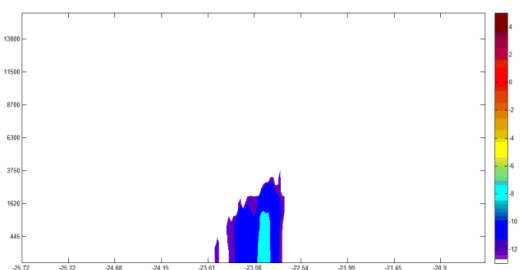
dia 08 – hora 9



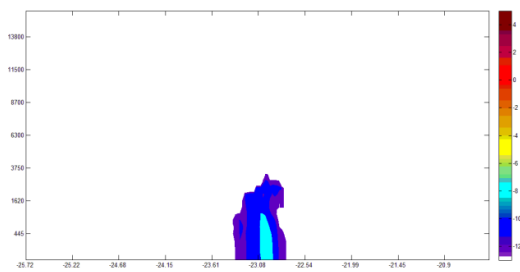
dia 08 – hora 12



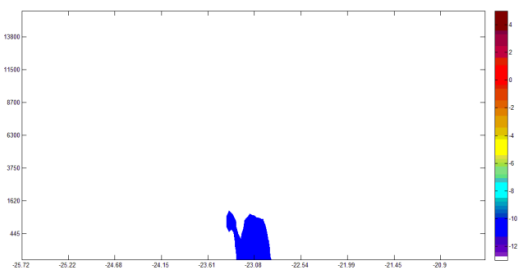
dia 08 – hora 15



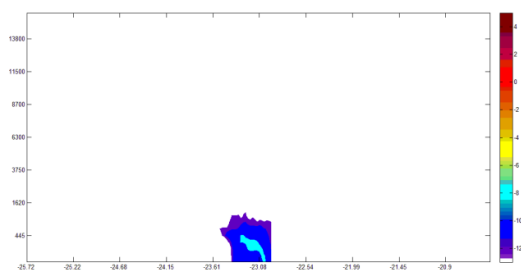
dia 8 – hora 18



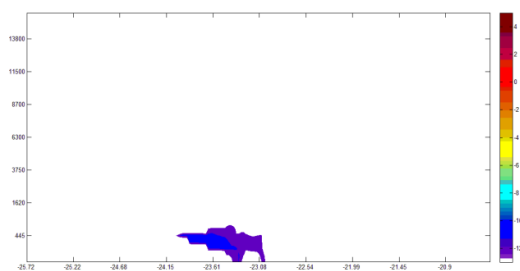
dia 08 – hora 21



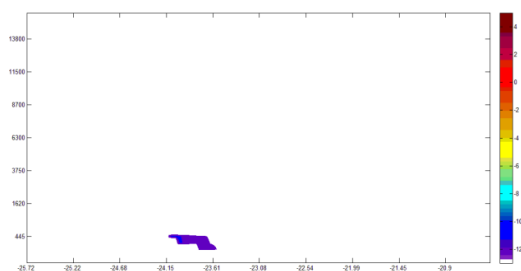
dia 08 – hora 24



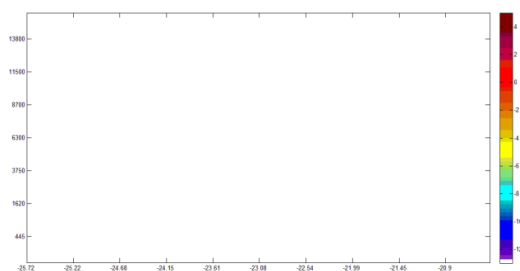
dia 09 – hora 3



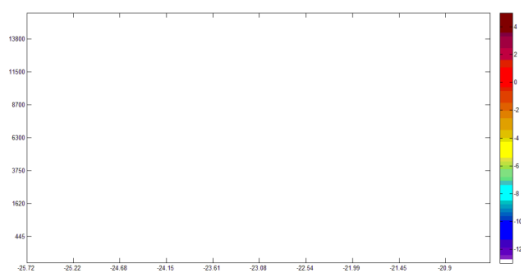
dia 09 – hora 6



dia 09 – hora 9



dia 09 – hora 12



dia 09 – hora 15

Figura 136 - Variação latitudinal média das concentrações com intervalo de 3 horas.

Avaliação da trajetória da pluma para o episódio 2

Como uma melhor forma de analisar a trajetória da pluma focar-se-á no núcleo de máximas concentrações (em vermelho na figura 137), sem entretanto deixar de observar o que ocorre com o restante da pluma.

A partir do instante inicial, nos primeiros 8 níveis eta (figura 137), observa-se um deslocamento para nordeste seguindo os ventos de sul devido a passagem do sistema

frontal. Observa-se entre os dias 23 e 24 um movimento da pluma associado ao centro de baixa pressão na costa do sudeste nos -44°W . Com o deslocamento deste centro para o oceano, a pluma passa a cobrir quase todo o domínio. Ressalta-se que comparado ao episódio 1, cuja a pluma em grande parte do tempo se concentrou entre os 46°W 44°W e 22°S 24°S , neste episódio a pluma ultrapassa tais limites já a partir da hora 6 do primeiro dia de emissão.

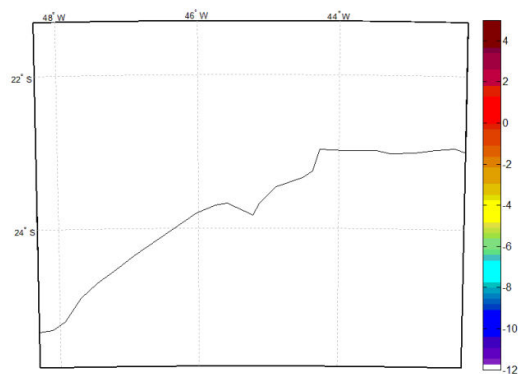
Em relação às concentrações, verifica-se uma variação entre: 5 (100 ppmv) no centro de liberação, 0 ($1,0 \times 10^{-3}$ ppmv) sobre o continente, -4 ($1,0 \times 10^{-7}$ ppmv) e -10 ($1,0 \times 10^{-13}$ ppmv).

A partir do dia 25 verifica-se a presença de uma área em branco (à esquerda das imagens) que corresponde ao centro de baixa pressão que passa a alterar o padrão de circulação na região sudeste registrando ventos de quadrante sul (figura 81 e 82). O deslocamento deste novo sistema empurra pluma para o interior do continente, afastando-a da costa.

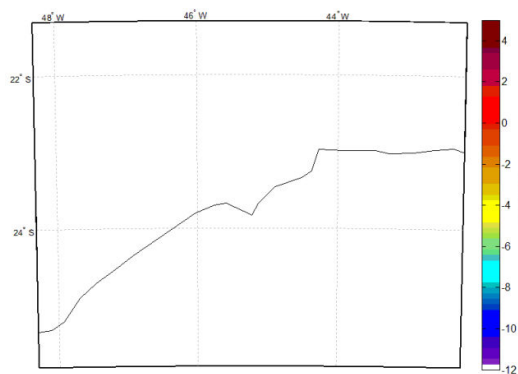
As imagens dos campos integrados para os níveis eta 9 a 39 (figura 138) mostram que a pluma evoluiu ao longo do tempo seguindo a trajetória do sistema frontal se deslocando para sudeste (onde se registra o máximo de concentrações) sobre o oceano, entre os 45°W e 42°W . Com o deslocamento da frente observa-se um espalhamento da pluma, embora seja mantido um período um núcleo de máximas concentrações (valendo aproximadamente $1,0 \times 10^{-3}$ ppmv) com uma trajetória para sudeste. A partir deste período a pluma passa a ocupar quase todo o domínio, sendo influenciada pelo centro de baixas pressões em superfície, sendo melhor visualizada nas imagens pelas concentrações em vermelho (valores entre 0 e 2). De forma semelhante aos 8 primeiros níveis eta, a depressão formada no dia 27 passa a influenciar na trajetória da pluma, confinando-a sobre o continente, onde se constata a redução das concentrações com o passar do tempo.

Os perfis verticais de temperatura para a CNAAB e para o Rio de Janeiro (figuras 113 a 122) em sua maioria apresentam o padrão típico de decaimento da temperatura do ar e do ponto de orvalho, bem como da umidade com a altura. Entretanto em alguns dias são observadas inversões de temperatura, como por exemplo: 22 (entre 975 hPa e 900hPa), 28 (entre 975 hPa e 900hPa), 29 (entre 825 hPa e 775hPa), 30 (entre 925 hPa e 875hPa) e 31 (entre 925 hPa e 900hPa) e da temperatura do ponto de orvalho. Relevando somente as informações destes perfis verticais, tais condições desfavorecem a dispersão, mantendo-os

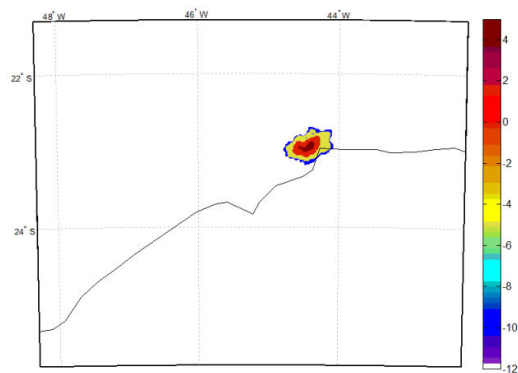
próximos a superfície e aumentando sua concentração. Entretanto, nos resultados obtidos, verificam também altas concentrações acima da camada limite, que pode ser explicado pela ausência da precipitação na simulação.



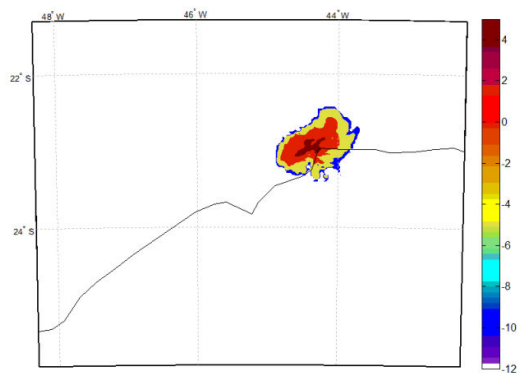
dia 22 – hora 21



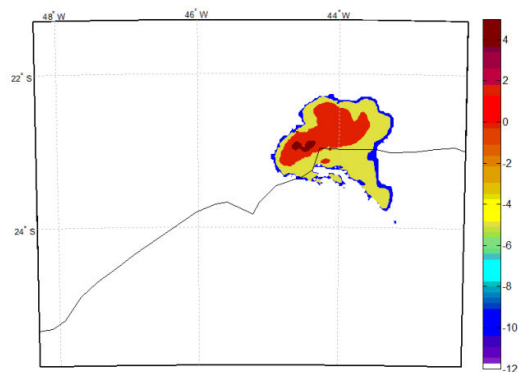
dia 22 – hora 24



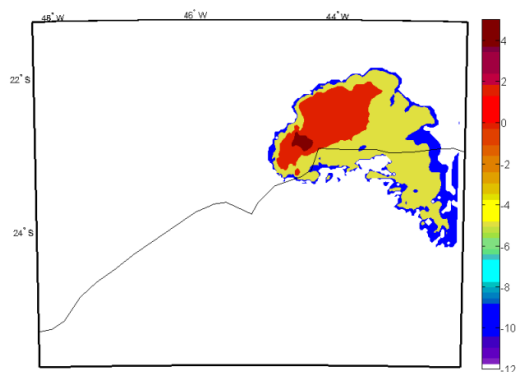
dia 23 – hora 3



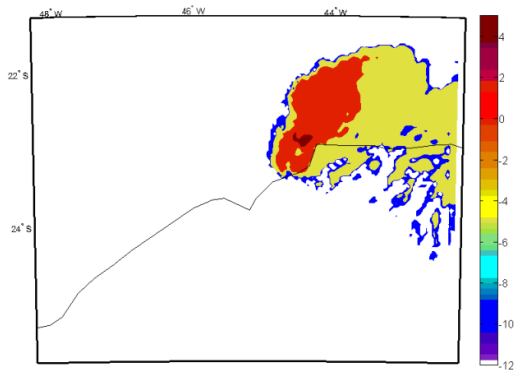
dia 23 – hora 6



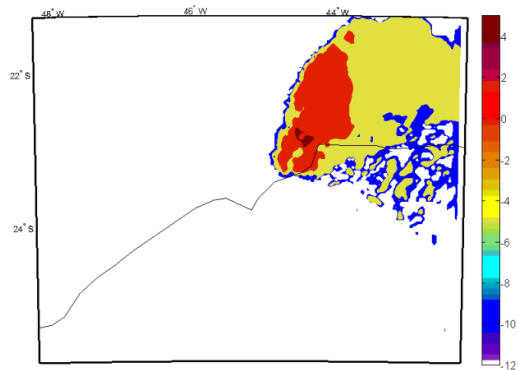
dia 23 – hora 9



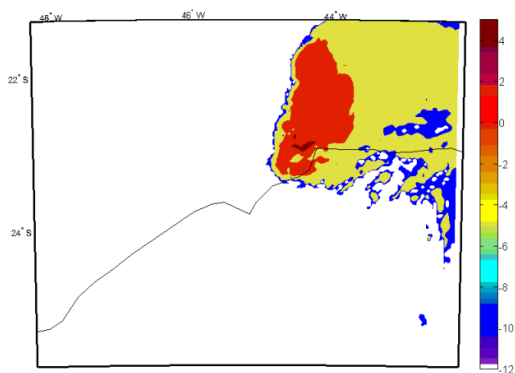
dia 23 – hora 12



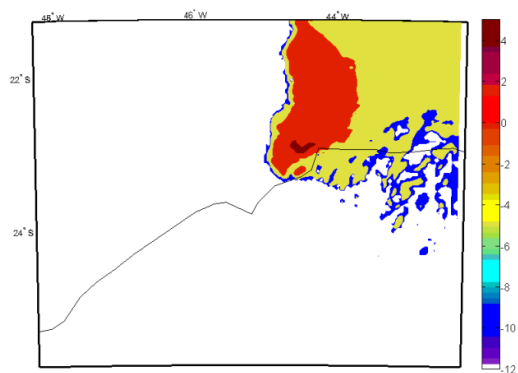
dia 23 – hora 15



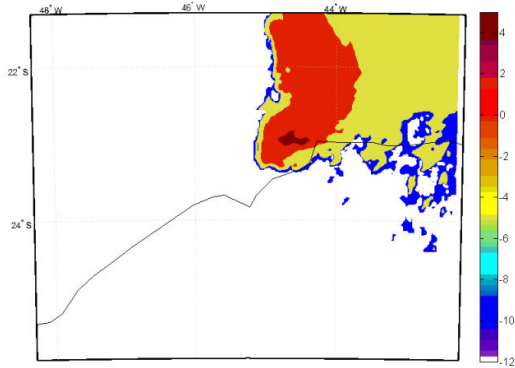
dia 23 – hora 18



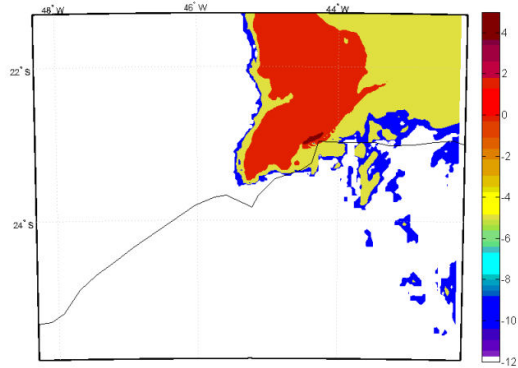
dia 23 – hora 21



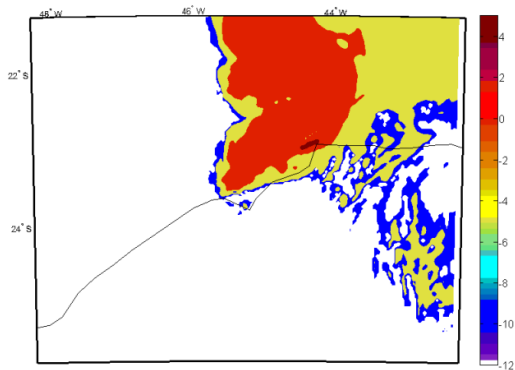
dia 23 – hora 24



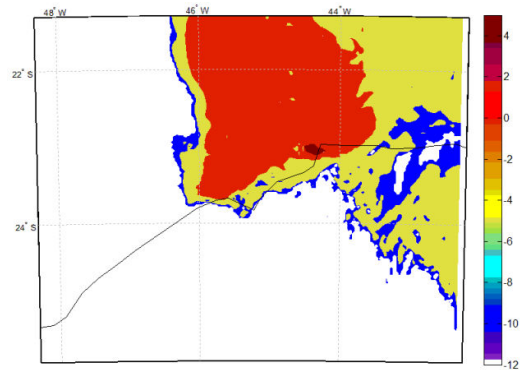
dia 24 – hora 3



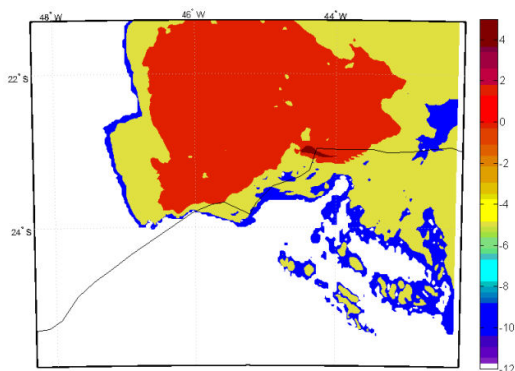
dia 24 – hora 6



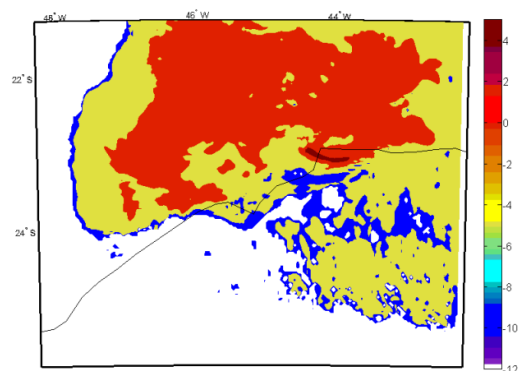
dia 24 – hora 9



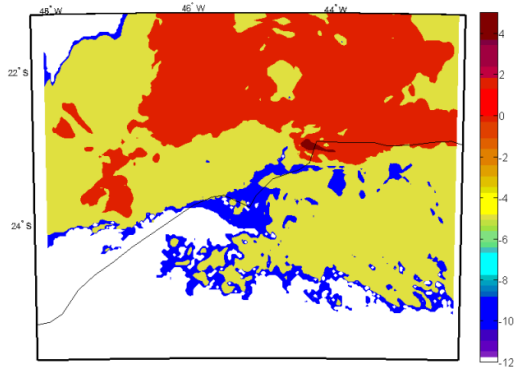
dia 24 – hora 12



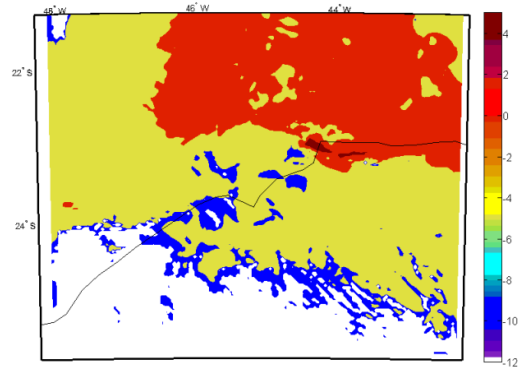
dia 24 – hora 15



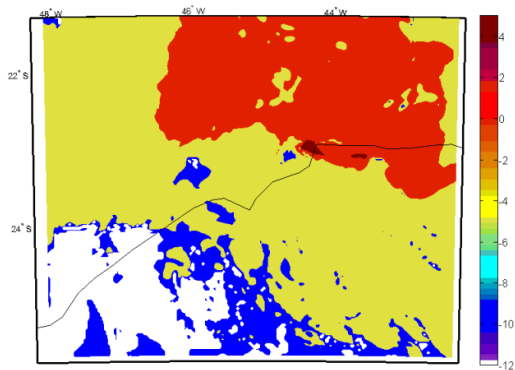
dia 24 – hora 18



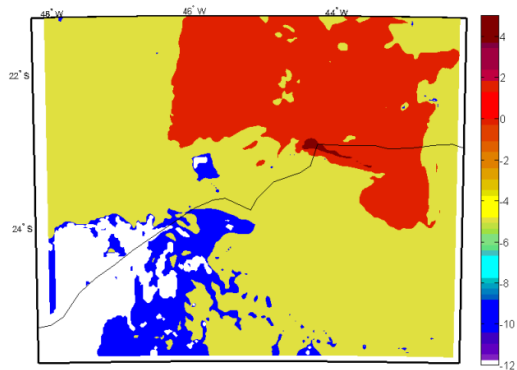
dia 24 – hora 21



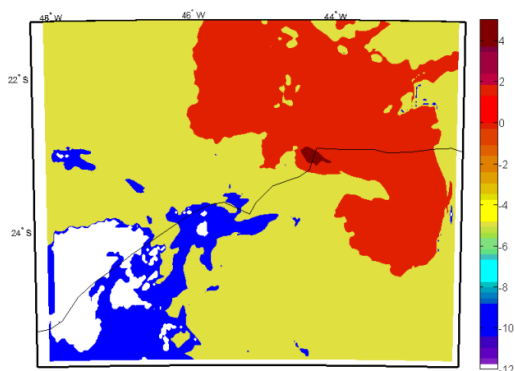
dia 24 – hora 24



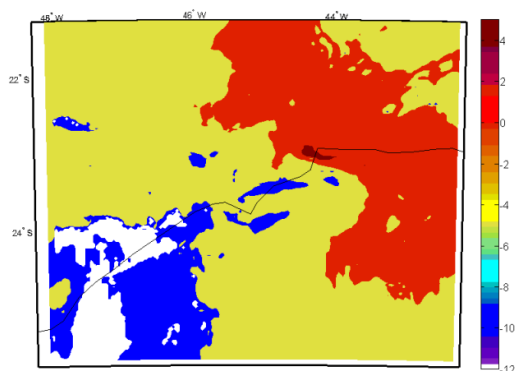
dia 25 – hora 3



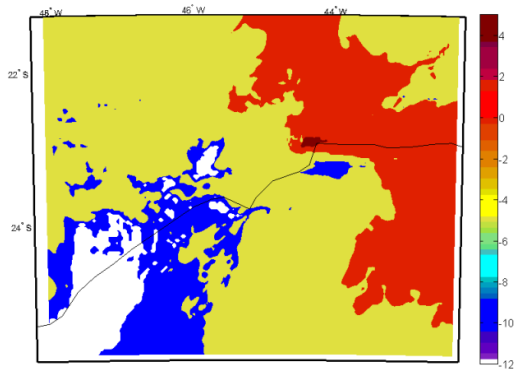
dia 25 – hora 6



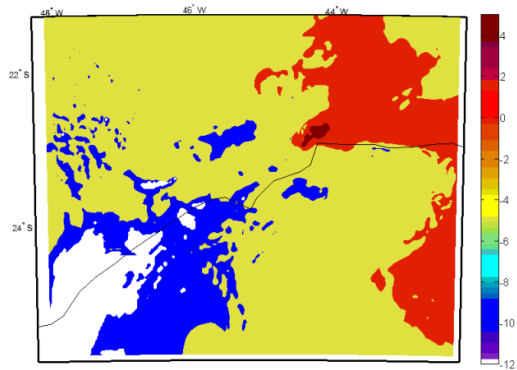
dia 25 – hora 9



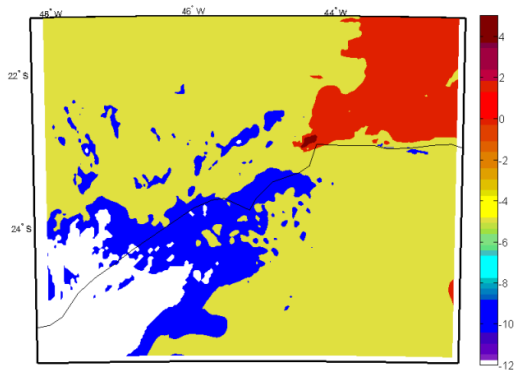
dia 25 – hora 12



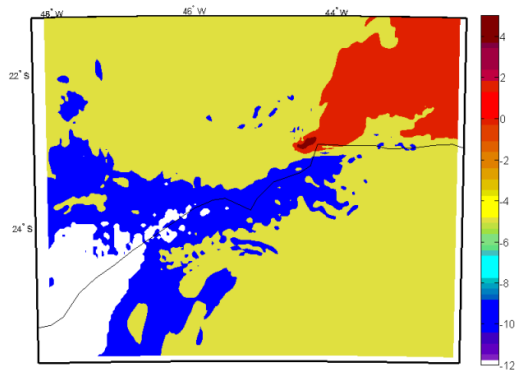
dia 25 – hora 15



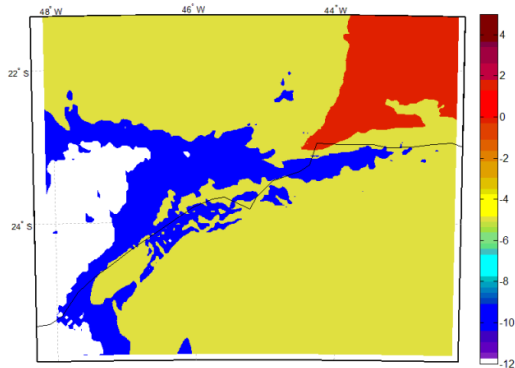
dia 25 – hora 18



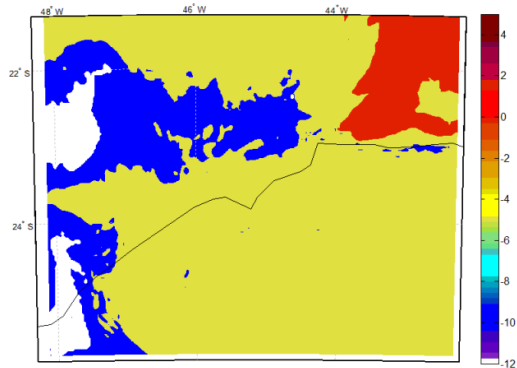
dia 25 – hora 21



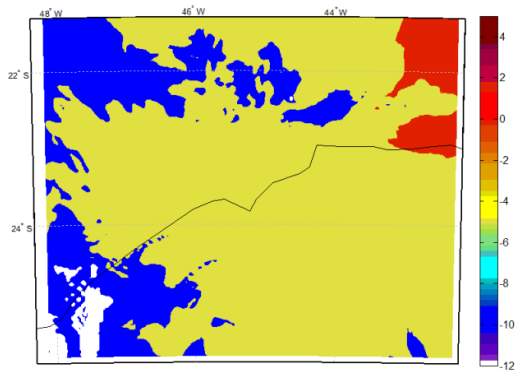
dia 25 – hora 24



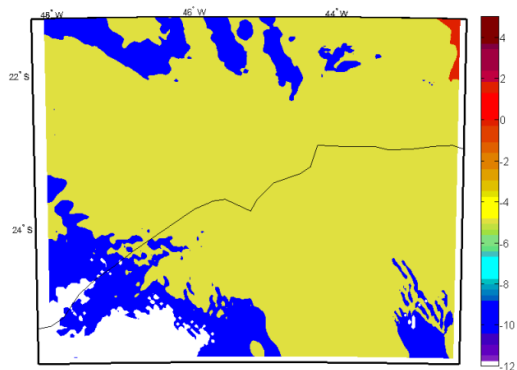
dia 26 – hora 3



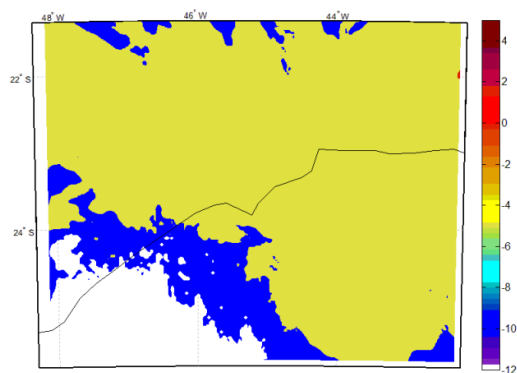
dia 26 – hora 6



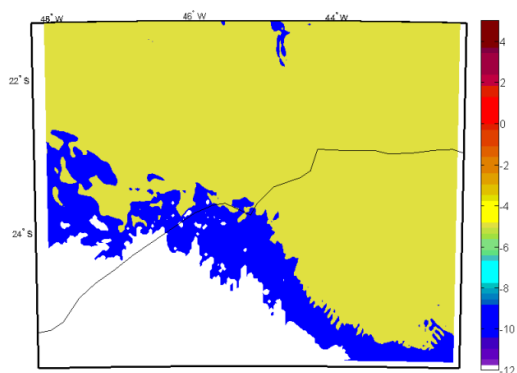
dia 26 – hora 9



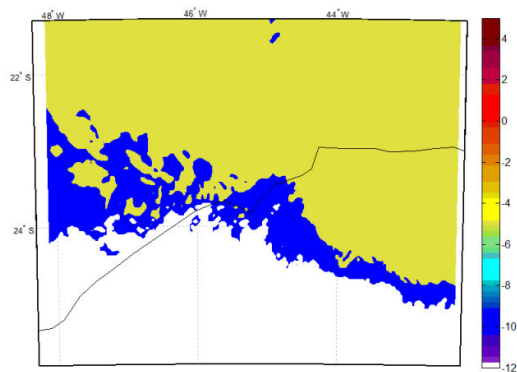
dia 26 – hora 12



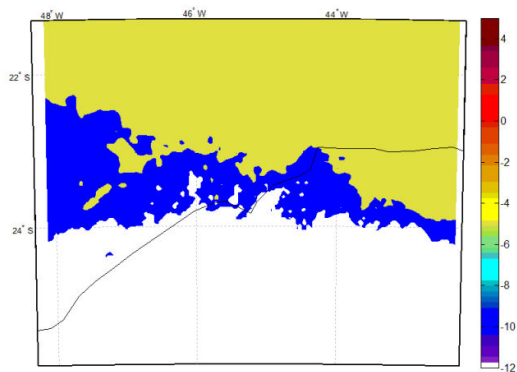
dia 26 – hora 15



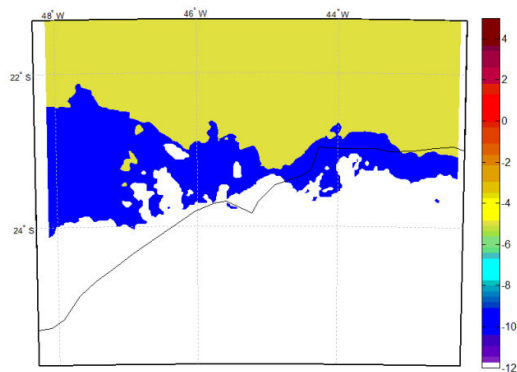
dia 26 – Hora 18



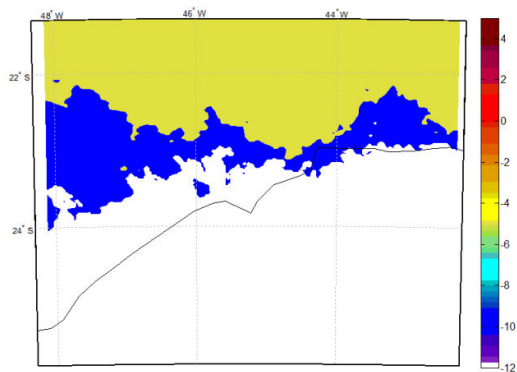
dia 26 – Hora 21



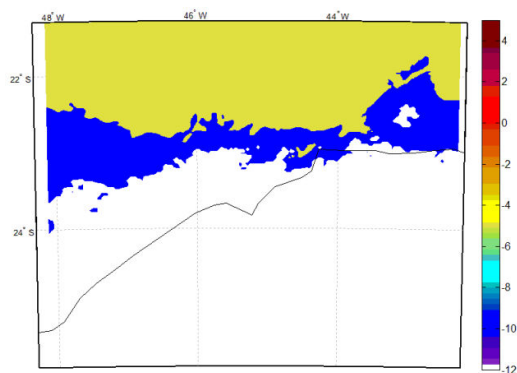
dia 26 – Hora 24



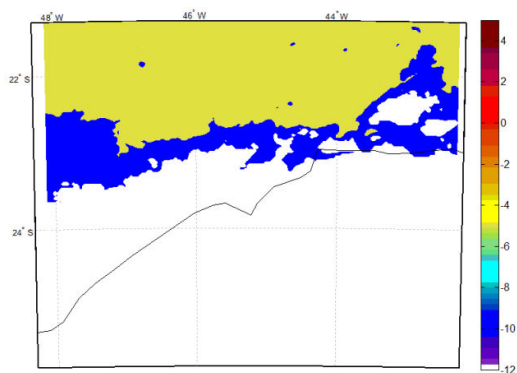
dia 27 – hora 3



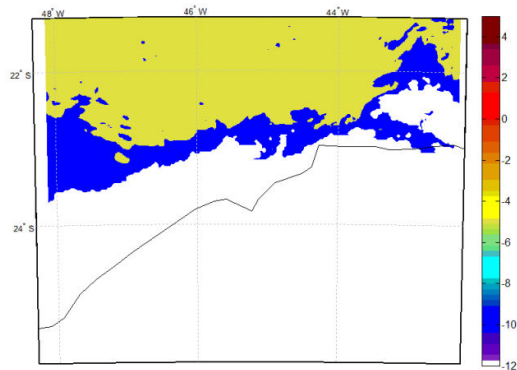
dia 27 – hora 6



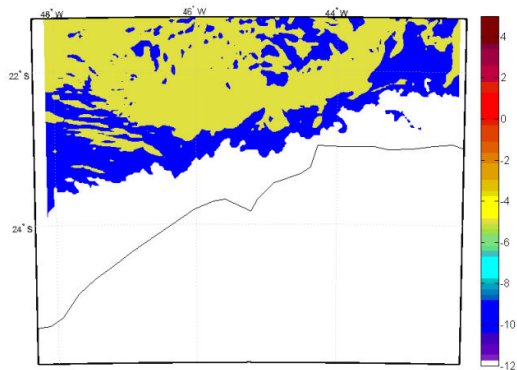
dia 27 – hora 9



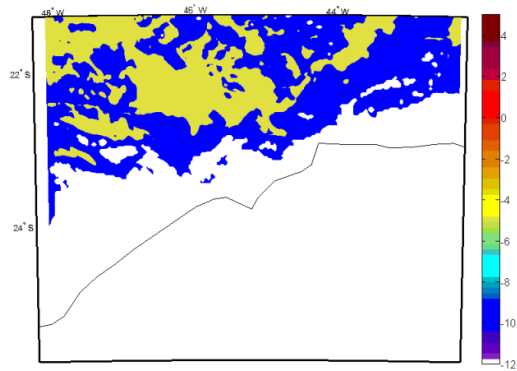
dia 27 – hora 12



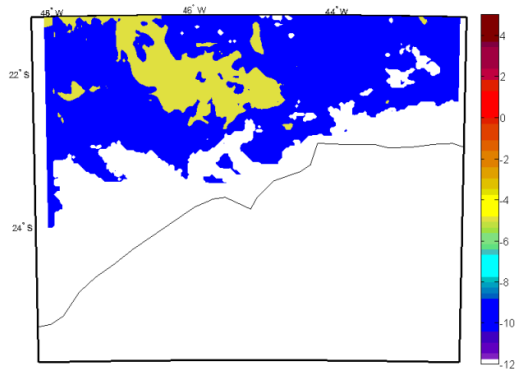
dia 27 – hora 15



dia 27 – hora 18

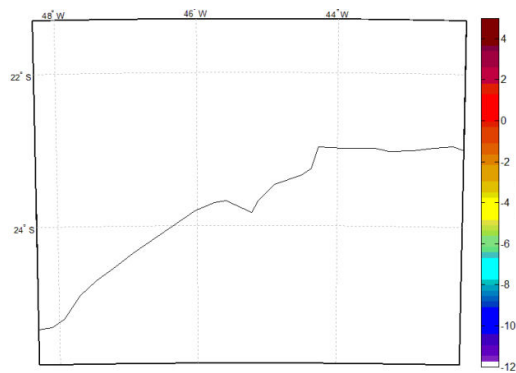


dia 27 – Hora 21

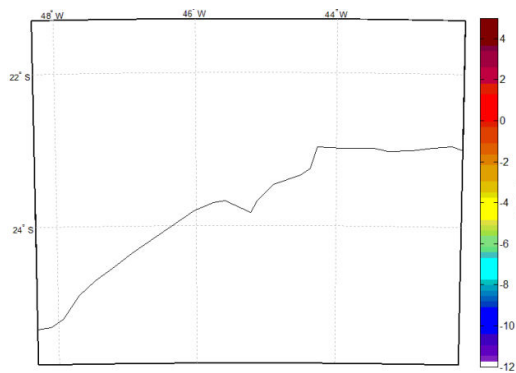


dia 27 – hora 24

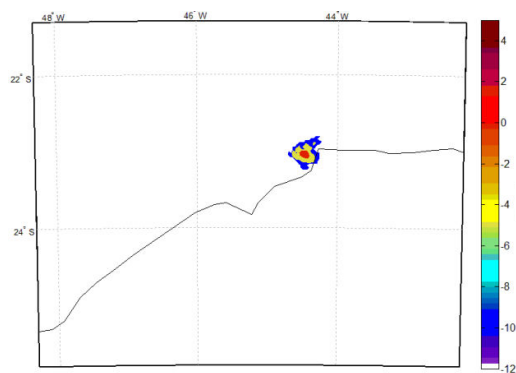
Figura 137 – Evolução temporal da pluma de dispersão com as concentrações integradas para os 8 primeiros níveis eta com intervalo de 3 horas.



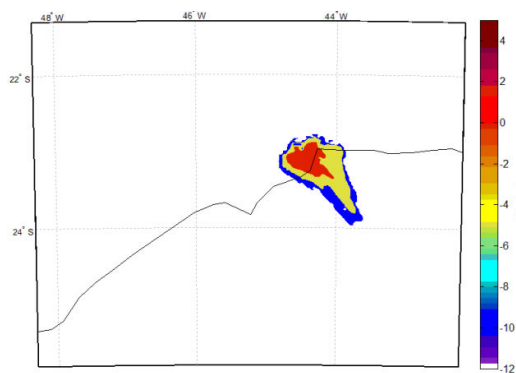
dia 22 – hora 21



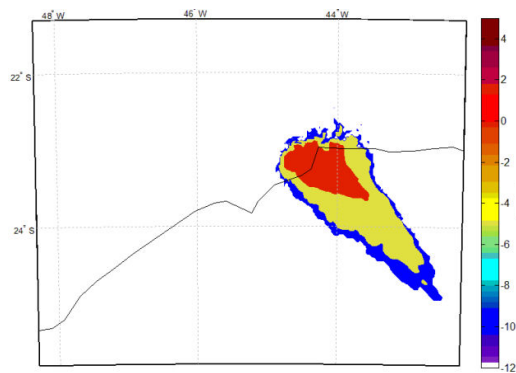
dia 22 – hora 24



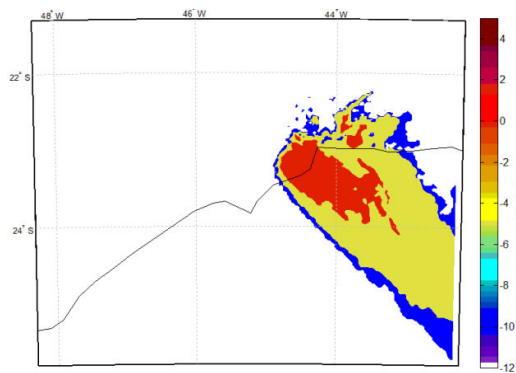
dia 23 – hora 3



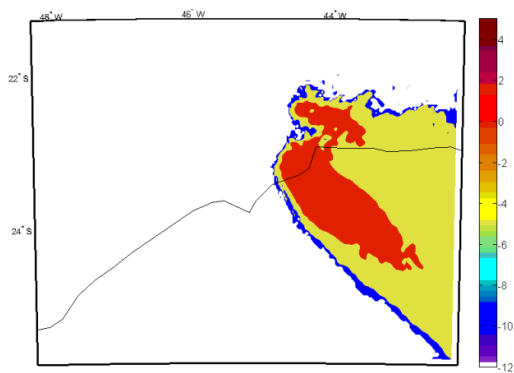
dia 23 – hora 6



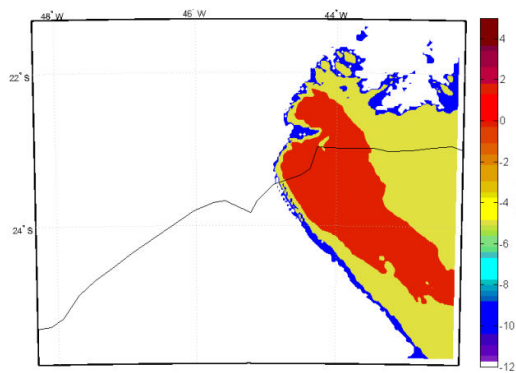
dia 23 – hora 9



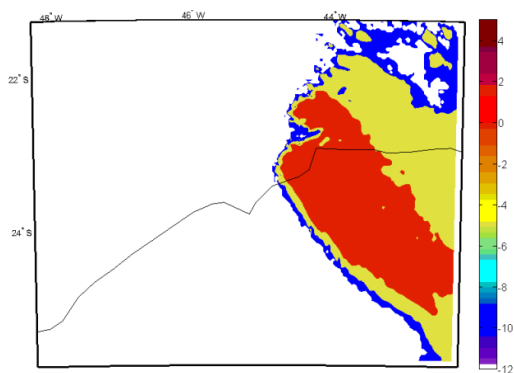
dia 23 – hora 12



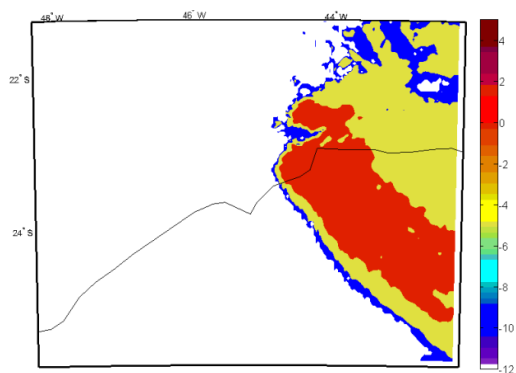
dia 23 – Hora 15



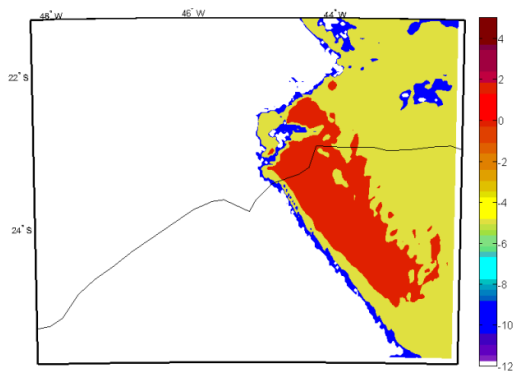
dia 23 – Hora 18



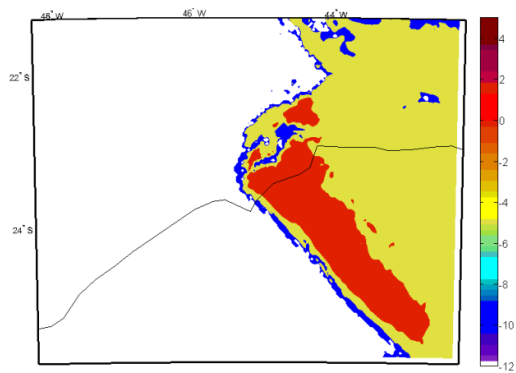
dia 23 – hora 21



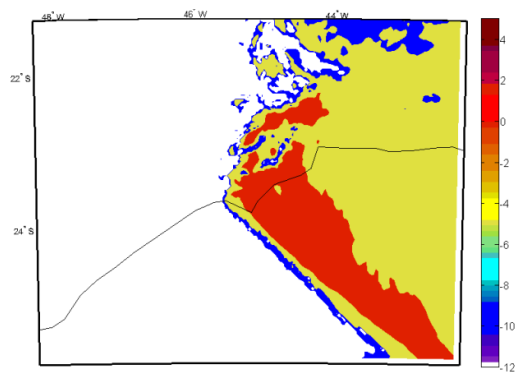
dia 23 – hora 24



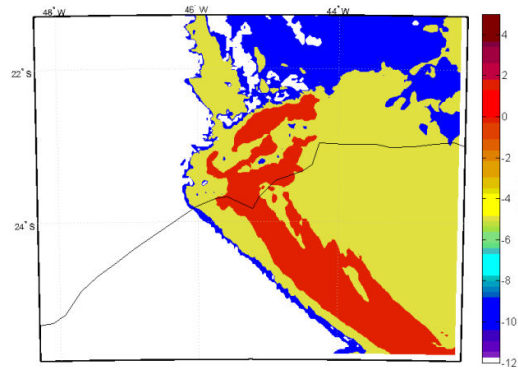
dia 24 – hora 3



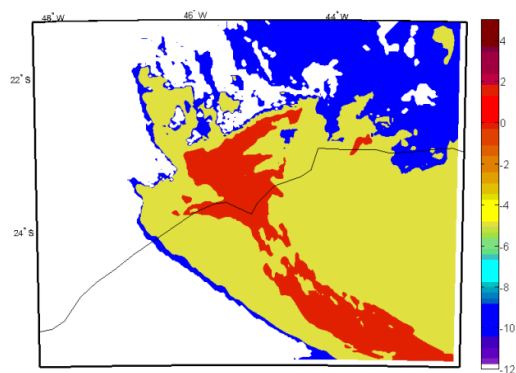
dia 24 – hora 6



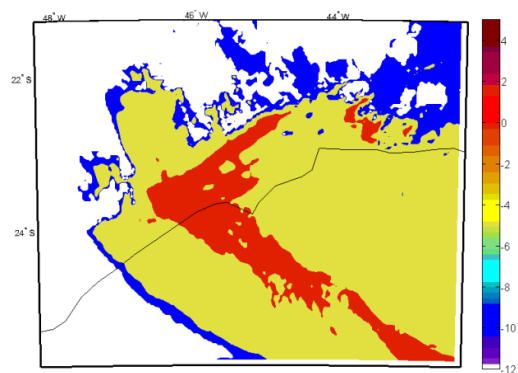
dia 24 – hora 9



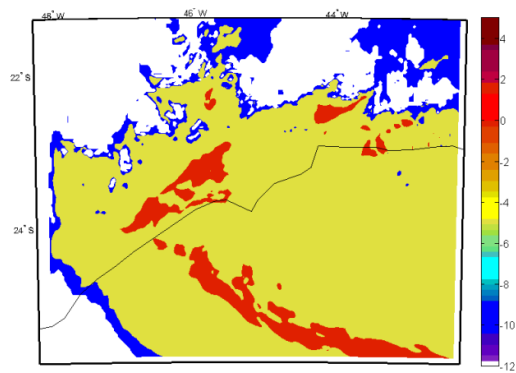
dia 24 – hora 12



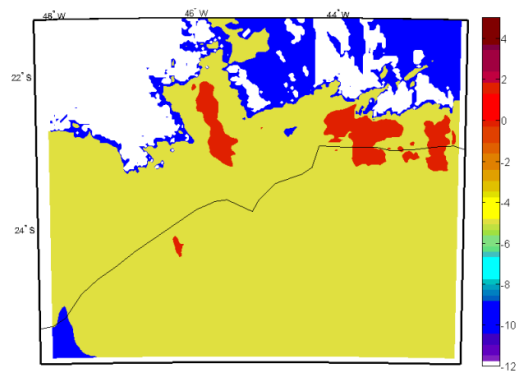
dia 24 – hora 15



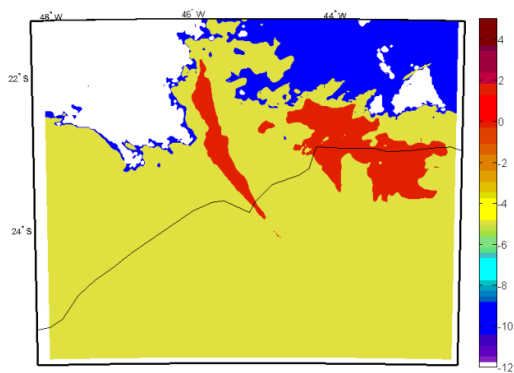
dia 24 – hora 18



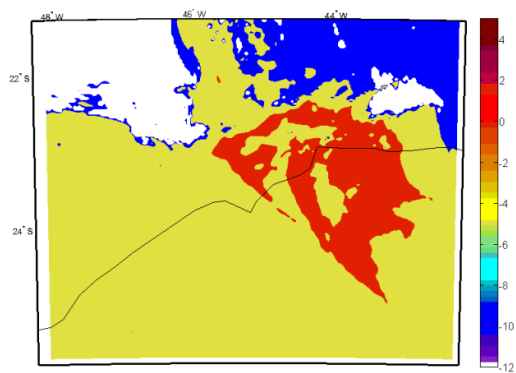
dia 24 – hora 21



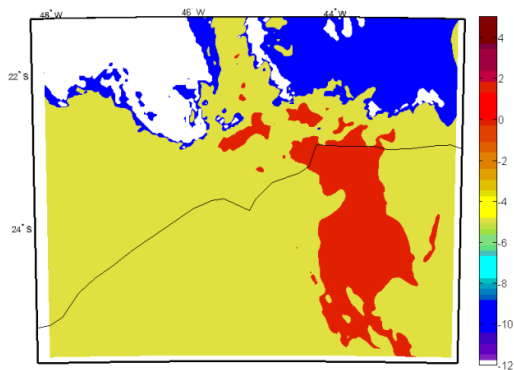
dia 24 – hora 24



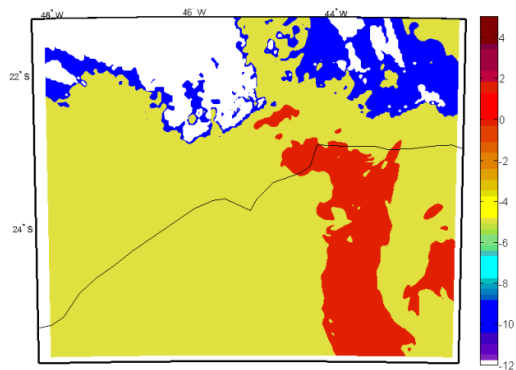
dia 25 – hora 3



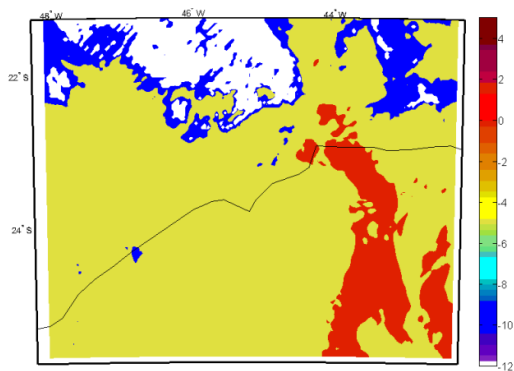
dia 25 – hora 6



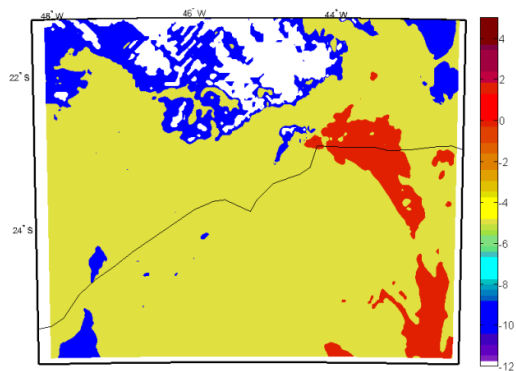
dia 25 – hora 9



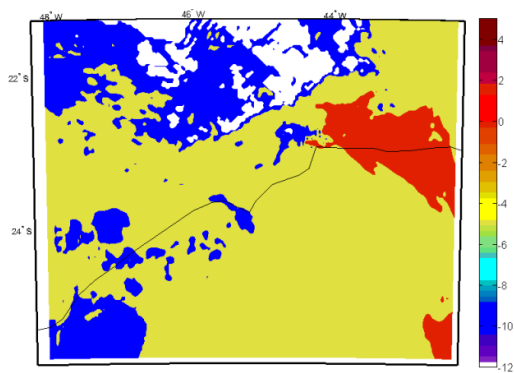
dia 25 – hora 12



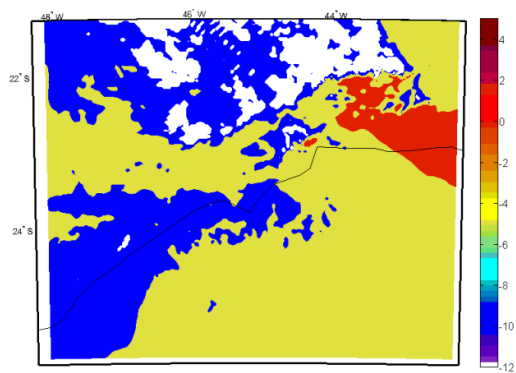
dia 25 – hora 15



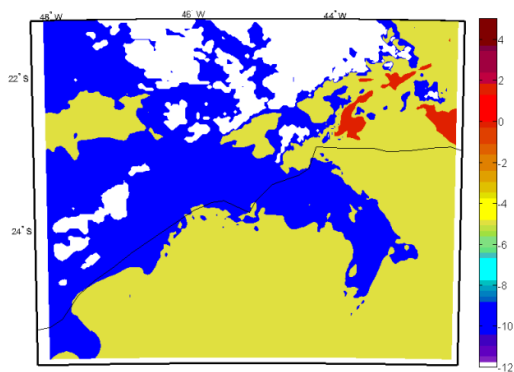
dia 25 – hora 18



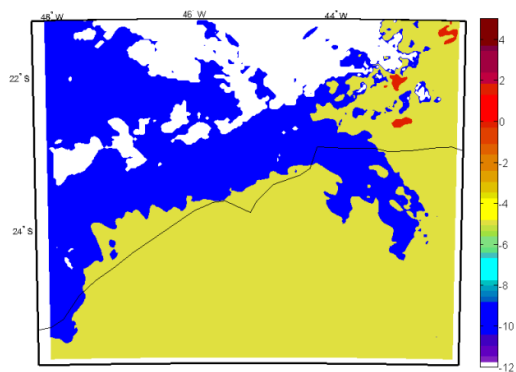
dia 25 – Hora 21



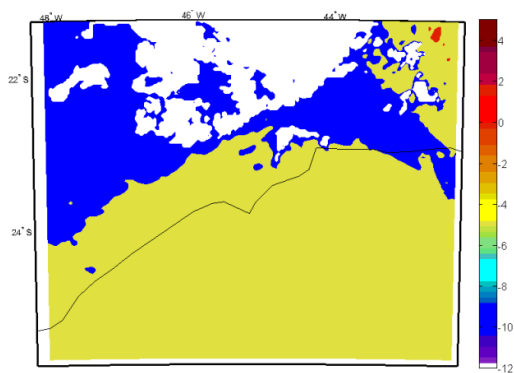
dia 25 – hora 24



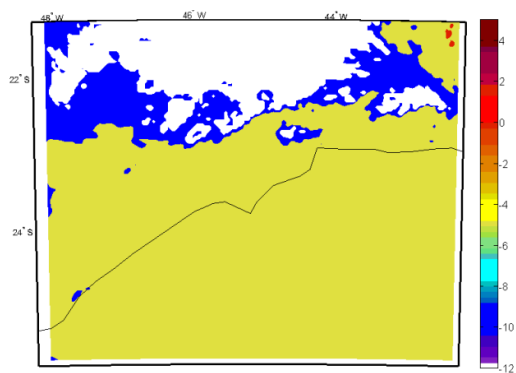
dia 26 – hora 3



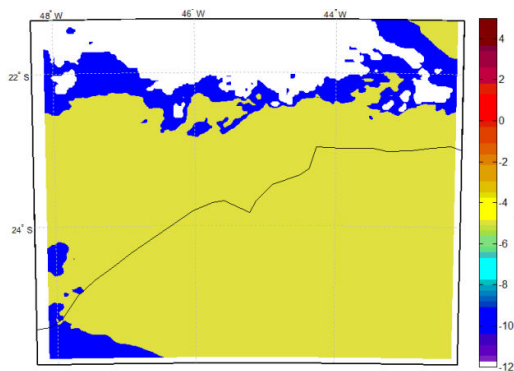
dia 26 – hora 6



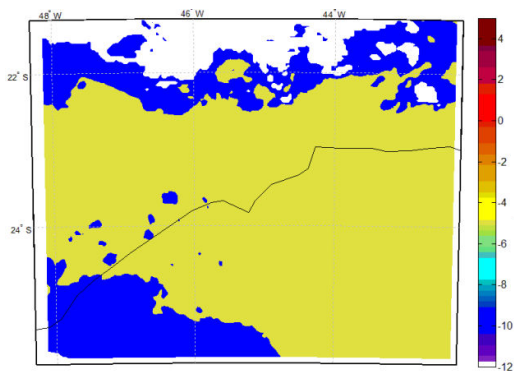
dia 26 – hora 9



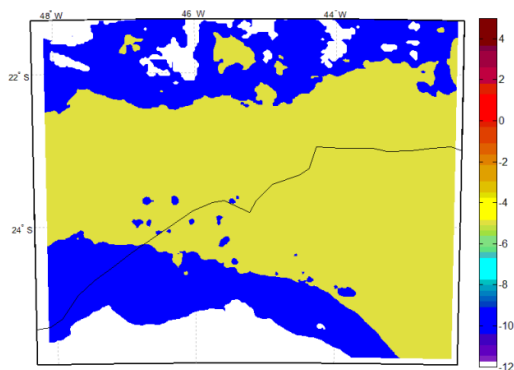
dia 26 – hora 12



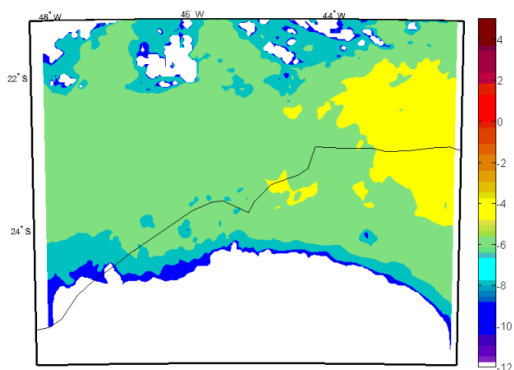
dia 26 – hora 15



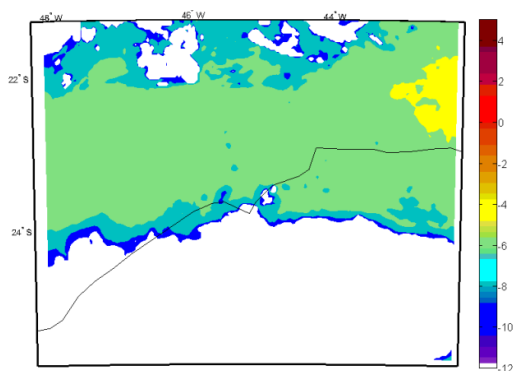
dia 26 – hora 18



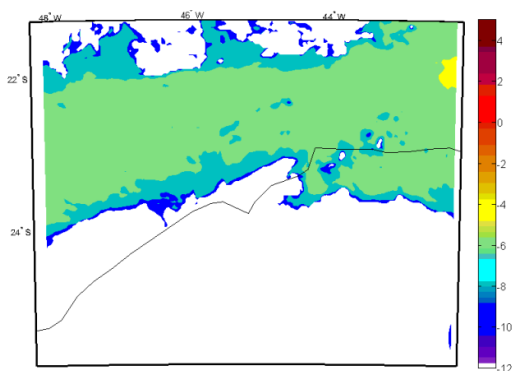
dia 26 – hora 21



dia 26 – hora 24



dia 27 – hora 3



dia 27 – hora 6

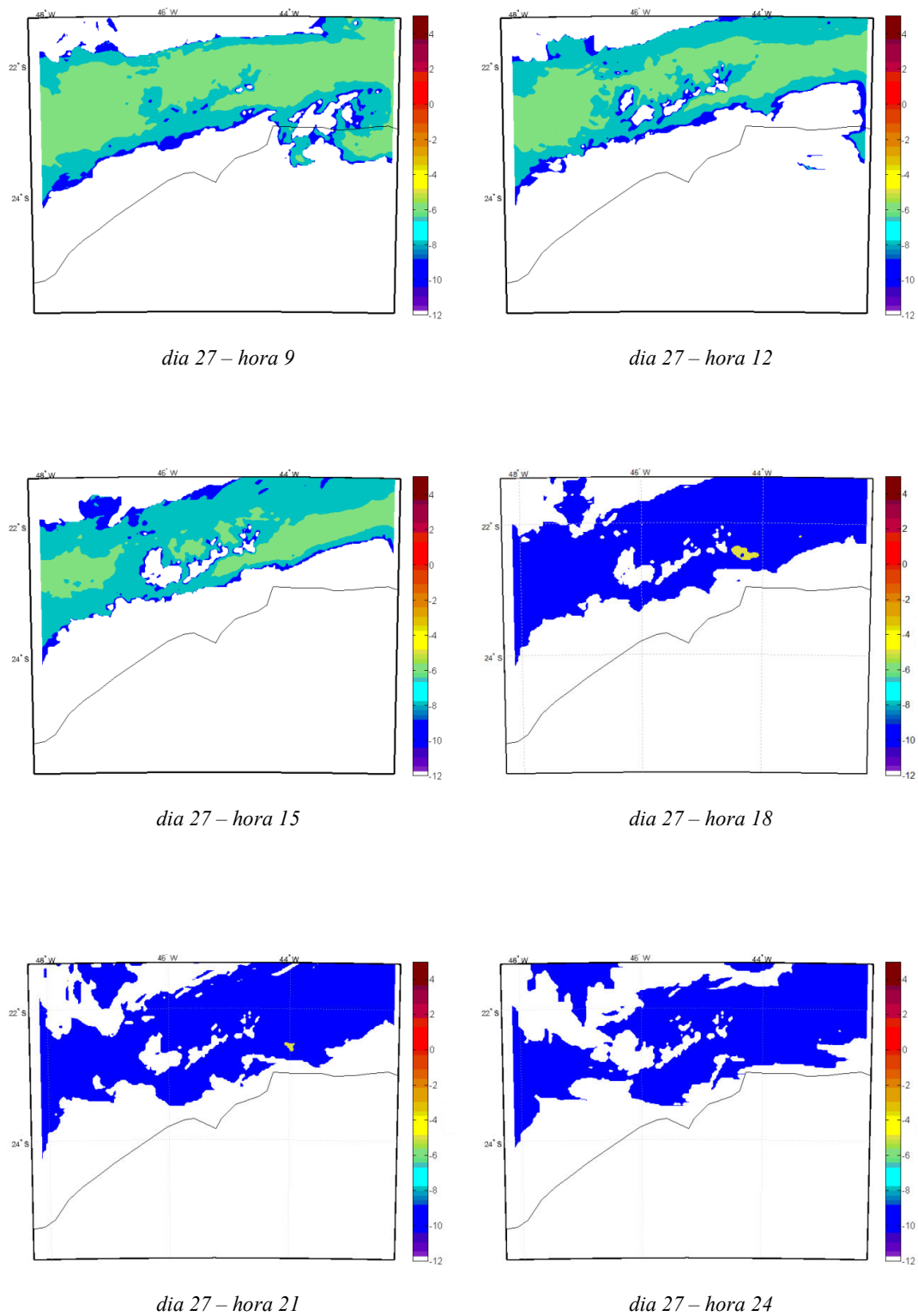
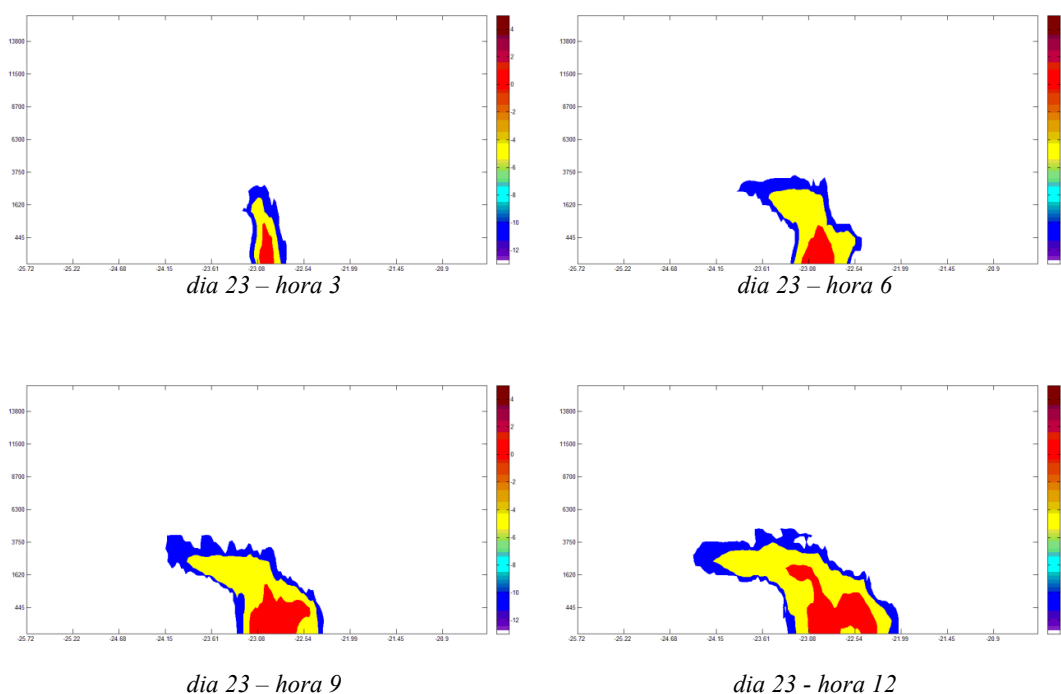


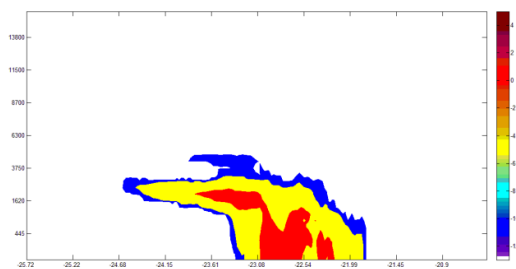
Figura 138 - – Evolução temporal da pluma de dispersão com as concentrações integradas para os níveis eta 9 a 39 com intervalo de 3 horas.

Os campos de variação latitudinal (figura 139) evidenciam um movimento da pluma para o norte nos primeiros níveis eta (dentro da CLA). E acima dos 10 primeiros níveis eta (1620m) para o sul (à esquerda das imagens) em relação ao centro de liberações (em 23°S).

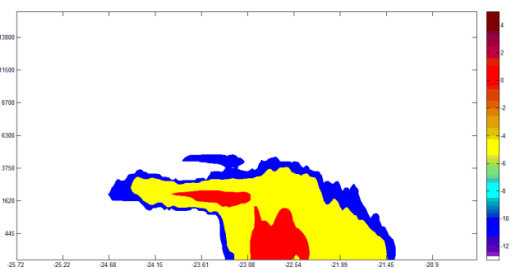
No dia 24 hora 6 também é verificado um deslocamento, dentro da CLA, para sul. Com o passar dos dias observa-se um movimento tanto para norte quanto para sul, passando a cobrir todo o domínio. A partir do dia 26 hora 3 observa-se um redução nas concentrações, ficando a pluma confinada na CLA a norte, enquanto a sul ainda encontra-se acima da CLA. O deslocamento do ciclone no dia 26 hora 21 movimenta a pluma para norte, confinando-a gradualmente aos limites da CLA.

As variações médias longitudinais (figura 140) indicam um deslocamento da pluma em relação ao centro de emissões (44.4°W) para entre os 15 níveis eta. No dia 24 hora 6 observa-se também um deslocamento para oeste, até cobrir todo o domínio em 24 hora 21. Este comportamento é mantido até o último dia de simulações com uma redução de concentrações. Em relação ao movimento vertical, durante o período inicial de emissões, a pluma concentra-se nos primeiros 15 níveis eta (3750m), ultrapassando este limite (atingindo o nível 20) a partir do dia 24 hora 9 até 26 hora 3. A partir deste período, a pluma volta a se concentrar entre os primeiros 15 níveis eta.

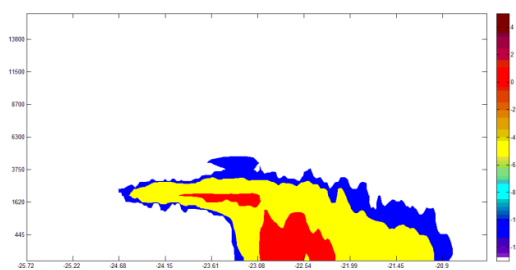




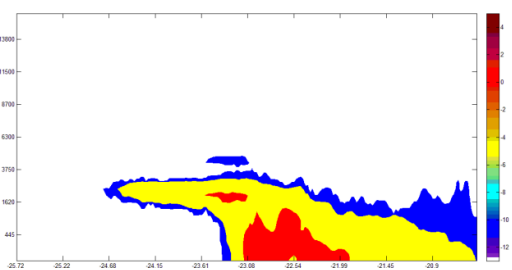
dia 23 – hora 15



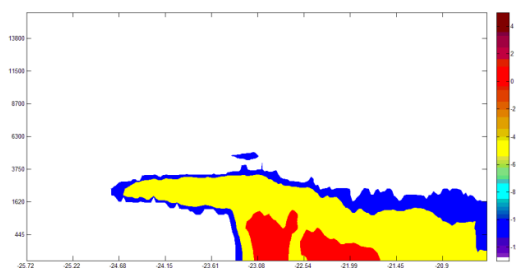
dia 23 – hora 18



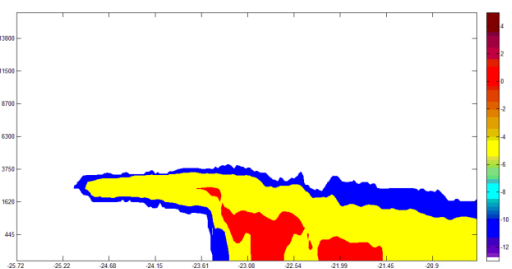
dia 23 – hora 21



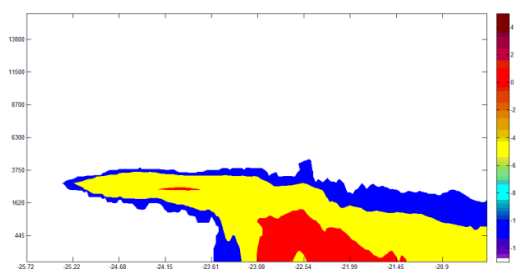
dia 23 – hora 24



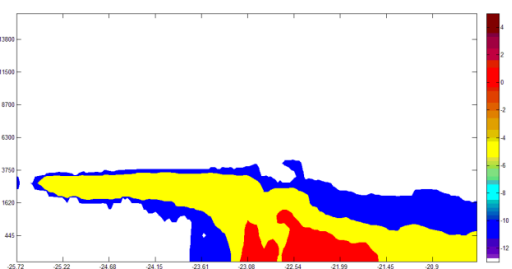
dia 24 – hora 3



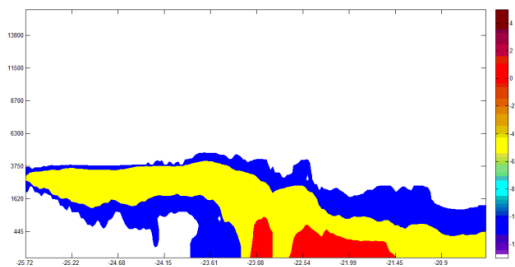
dia 24 – hora 6



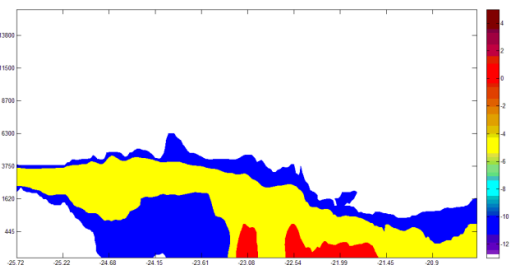
dia 24 – hora 9



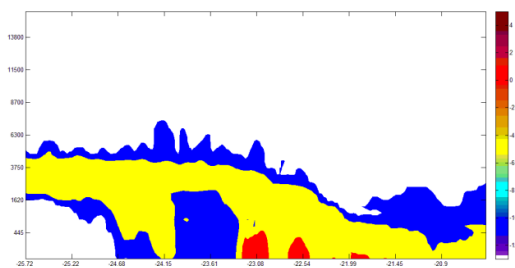
dia 24 - hora 12



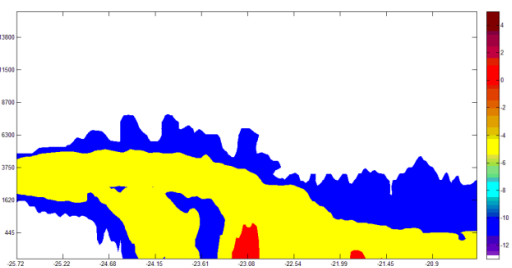
dia 24 – hora 15



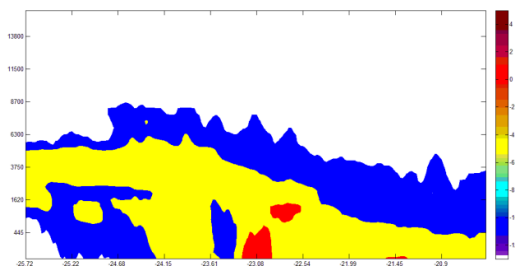
dia 24 – hora 18



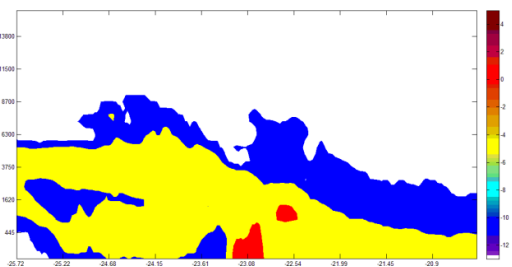
dia 24 – hora 21



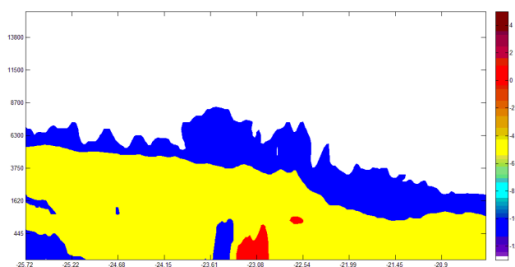
dia 24 – hora 24



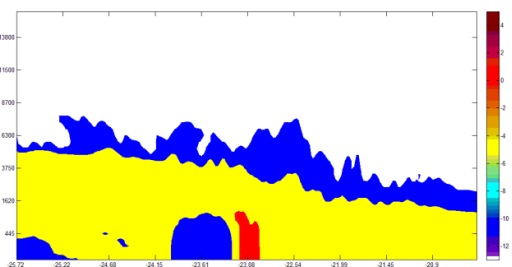
dia 25 – hora 3



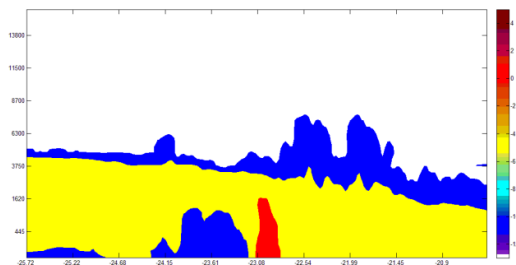
dia 25 – hora 6



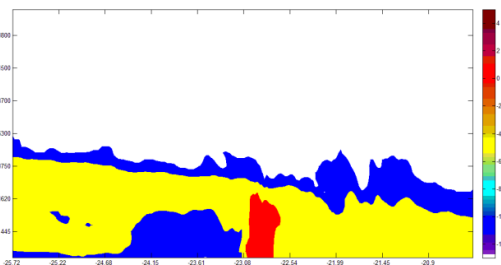
dia 25 – hora 9



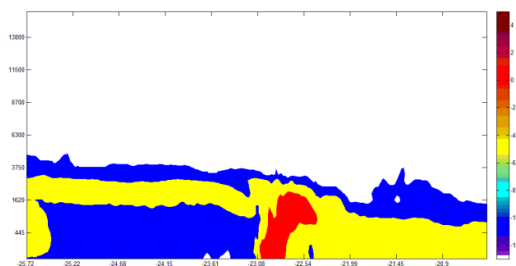
dia 25 – hora 12



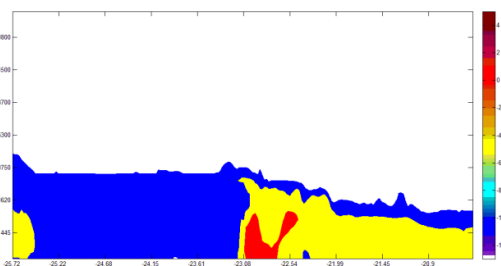
dia 25 – hora 15



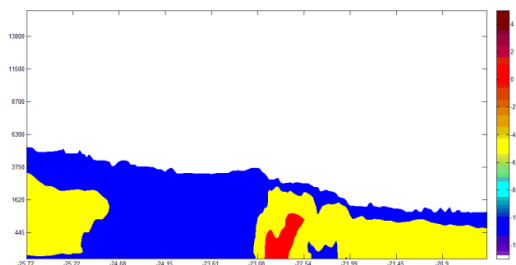
dia 25 – hora 18



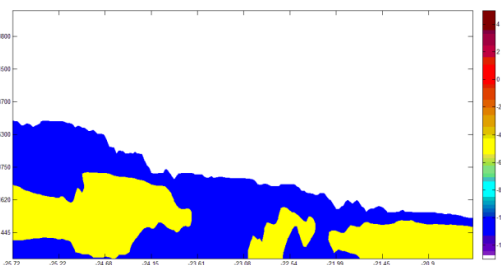
dia 25 – hora 21



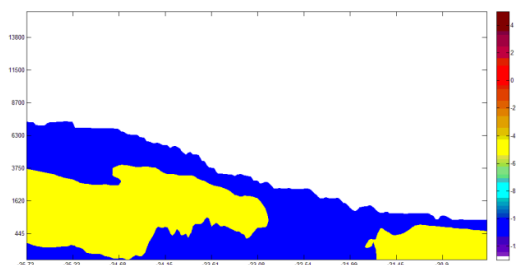
dia 25 – Hora 24



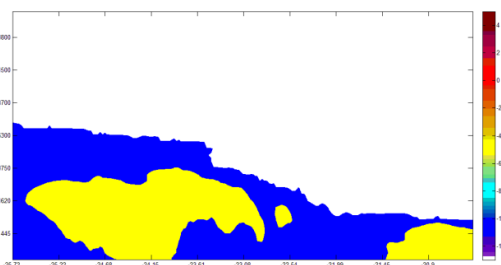
dia 26 – hora 3



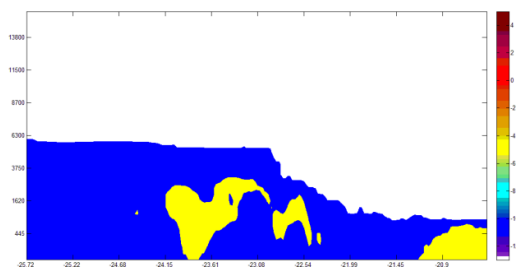
dia 26 – hora 6



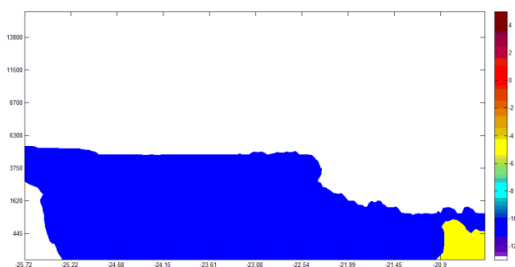
dia 26 – hora 9



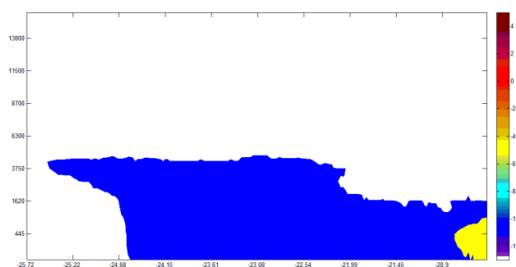
dia 26 – hora 12



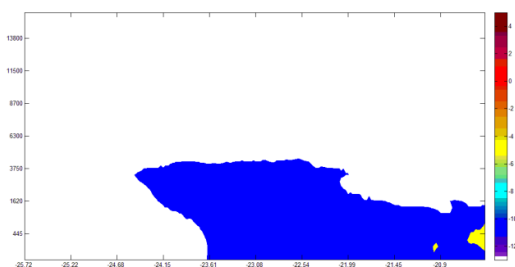
dia 26 – hora 1



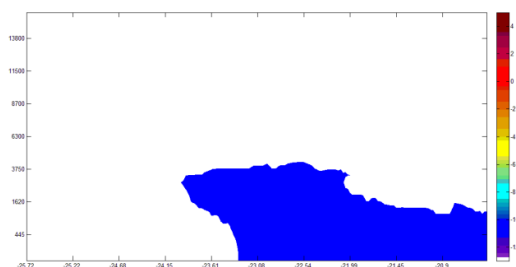
dia 26 – hora 18



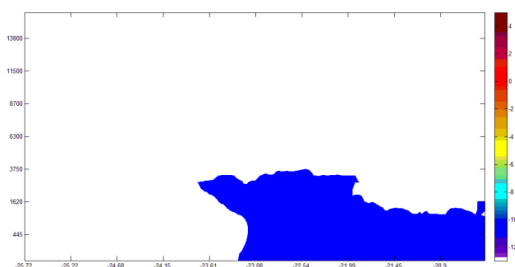
dia 26 – hora 21



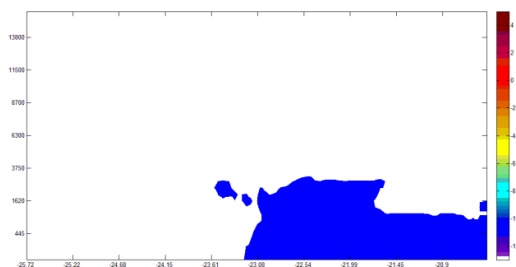
dia 26 – hora 24



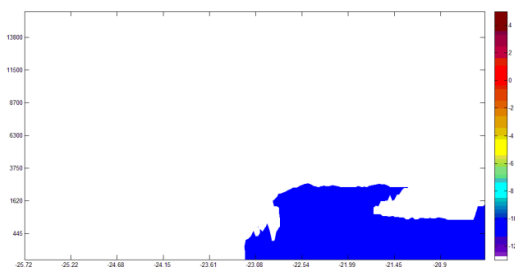
dia 27 – hora 3



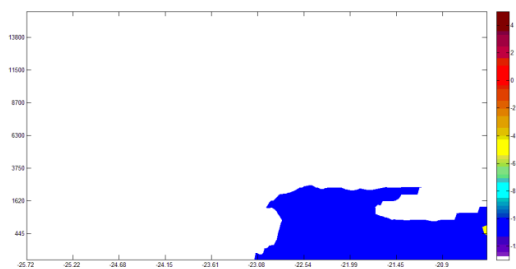
dia 27 – hora 6



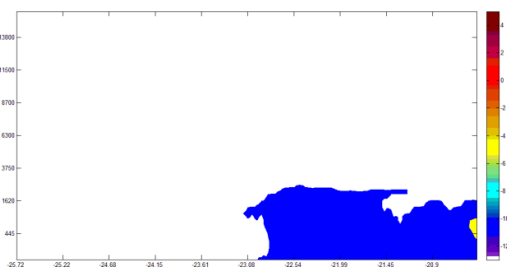
dia 27 – hora 9



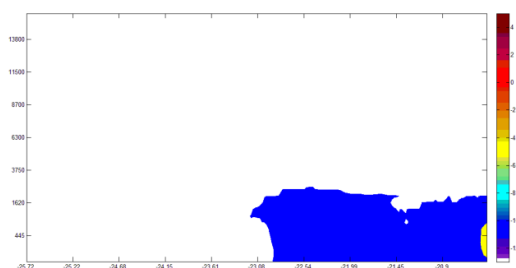
dia 27 – hora 12



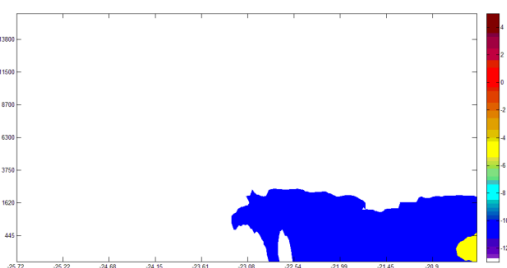
dia 27 – hora 15



dia 27 – hora 18

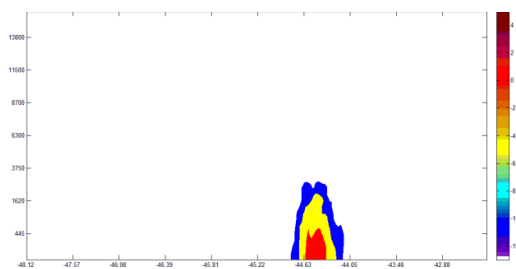


dia 27 – hora 21

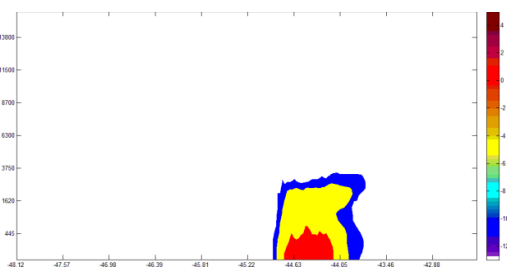


dia 27 – hora 24

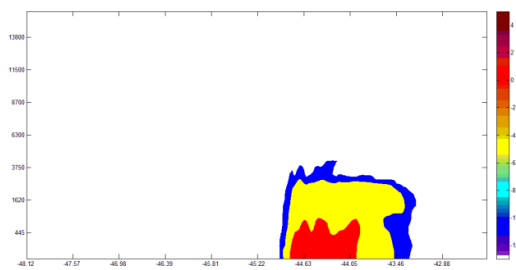
Figura 139 - Variação latitudinal média das concentrações com intervalo de 3 horas.



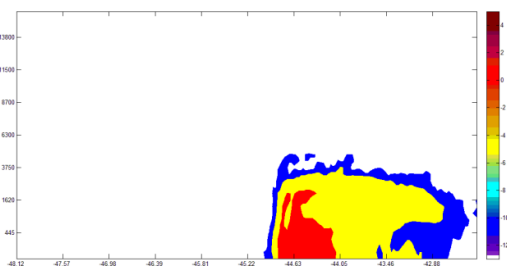
dia 23 – hora 3



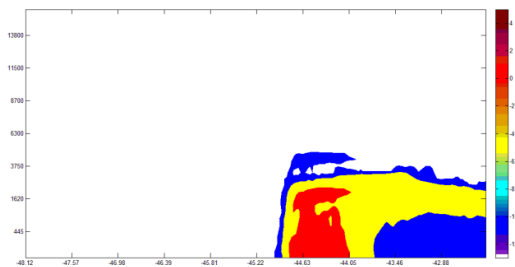
dia 23 – hora 6



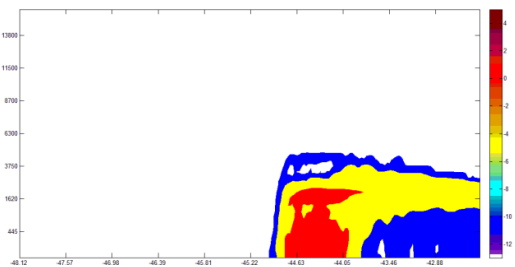
dia 23 – hora 9



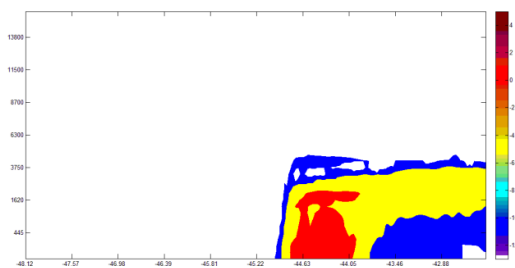
dia 23 – hora 12



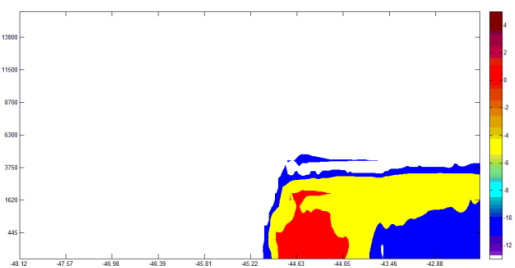
dia 23 – hora 15



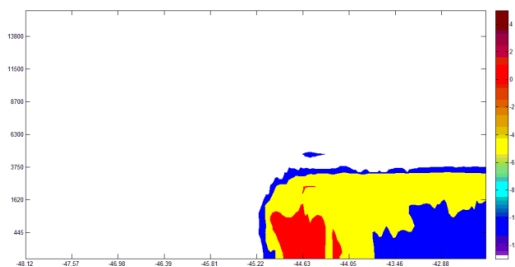
dia 23 – hora 18



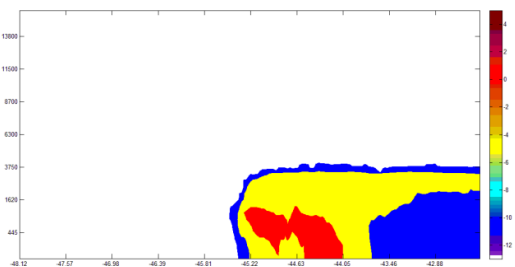
dia 23 – hora 21



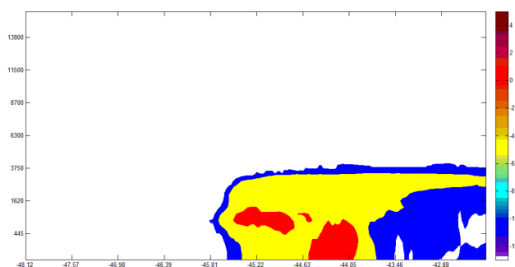
dia 23 – hora 24



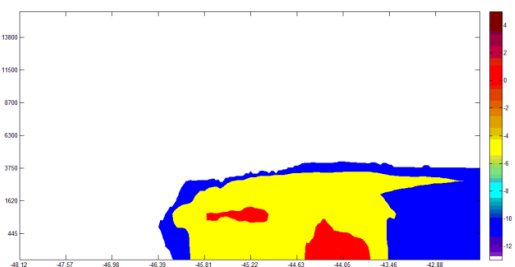
dia 24 – hora 3



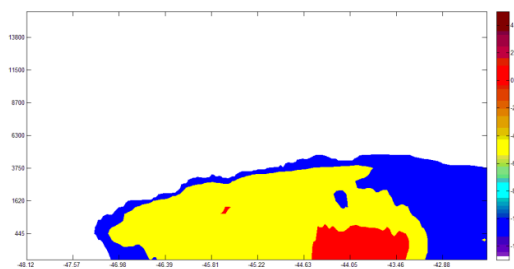
dia 24 – hora 6



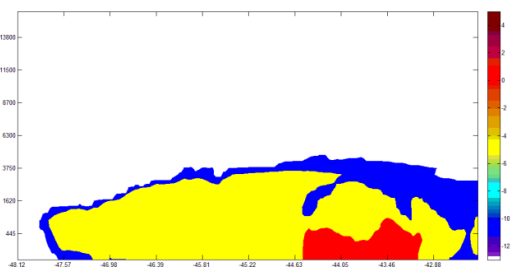
dia 24 – hora 9



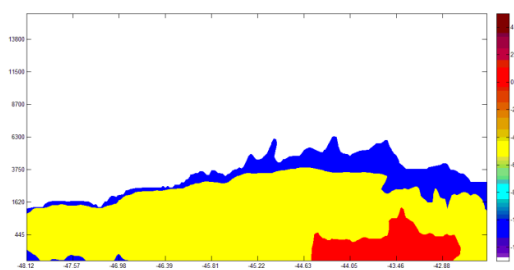
dia 24 – hora 12



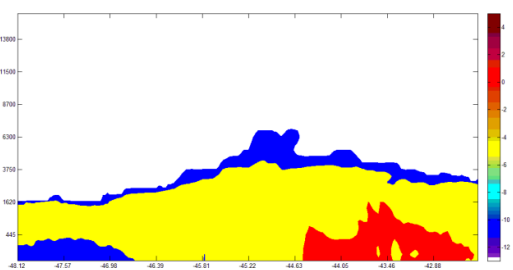
dia 24 – hora 15



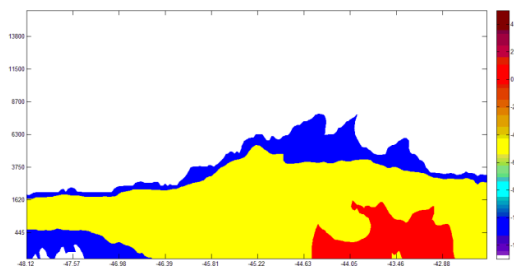
dia 24 – hora 18



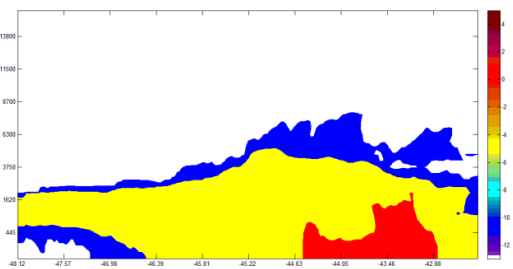
dia 24 – hora 21



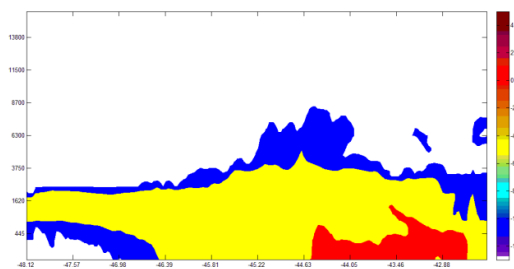
dia 24 – hora 24



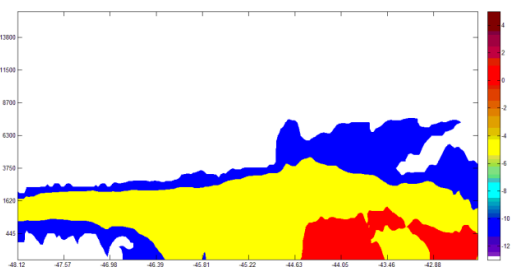
dia 25 – hora 3



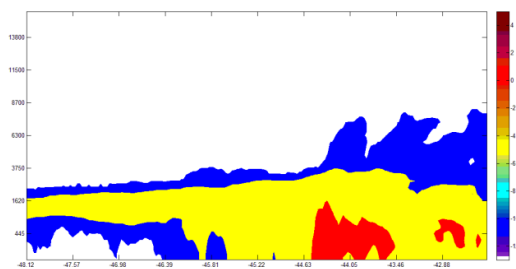
dia 25 – hora 6



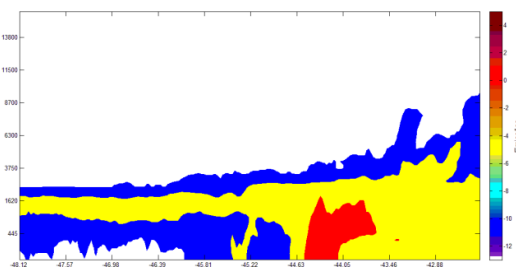
dia 25 – hora 9



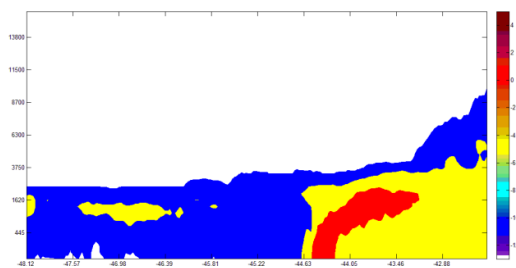
dia 25 – hora 12



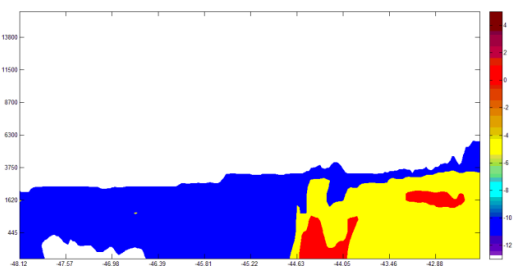
dia 25 – hora 15



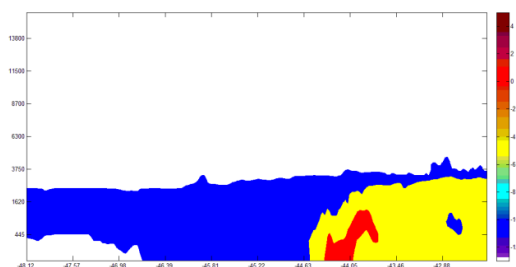
dia 25 – hora 18



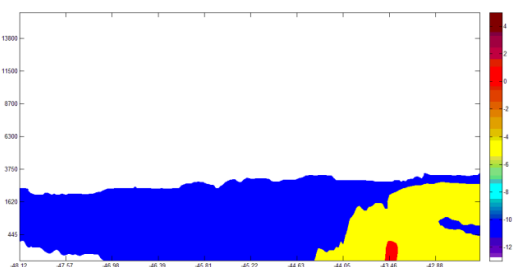
dia 25 – hora 21



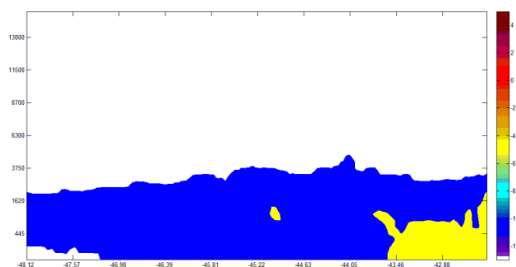
dia 25 – hora 24



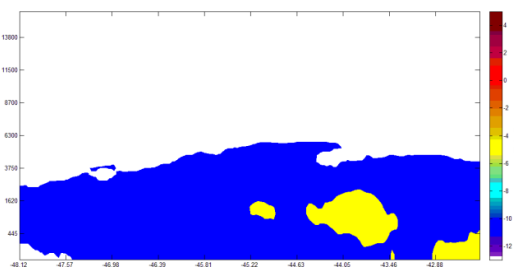
dia 26 – hora 3



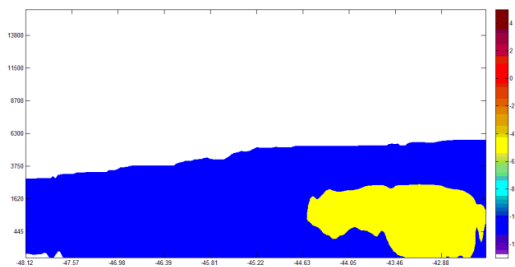
dia 26 – hora 6



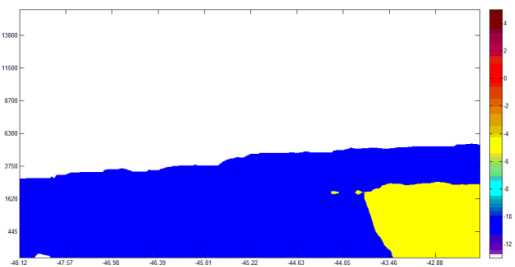
dia 26 – hora 9



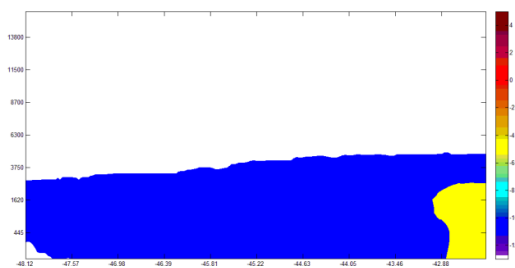
dia 26 – hora 12



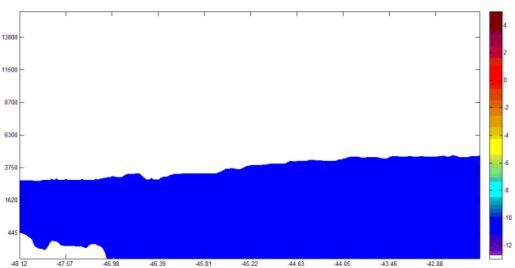
dia 26 – hora 15



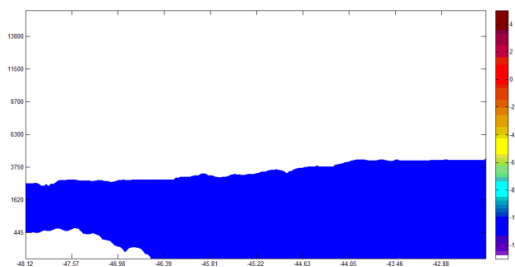
dia 26 – hora 18



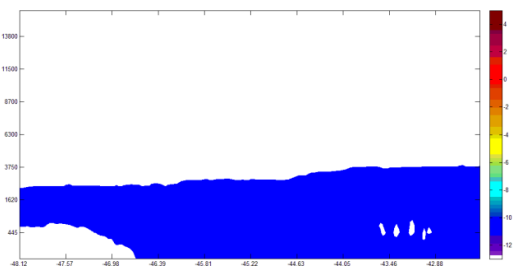
dia 26 – hora 21



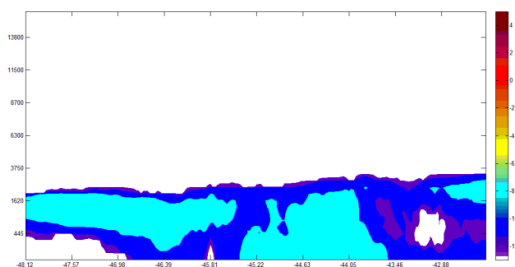
dia 26 – hora 24



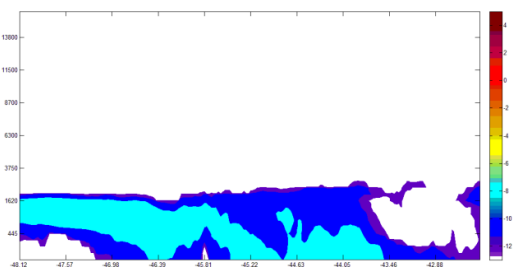
dia 27 – hora 3



dia 27 – hora 6



dia 27 – hora 9



dia 27 – hora 12

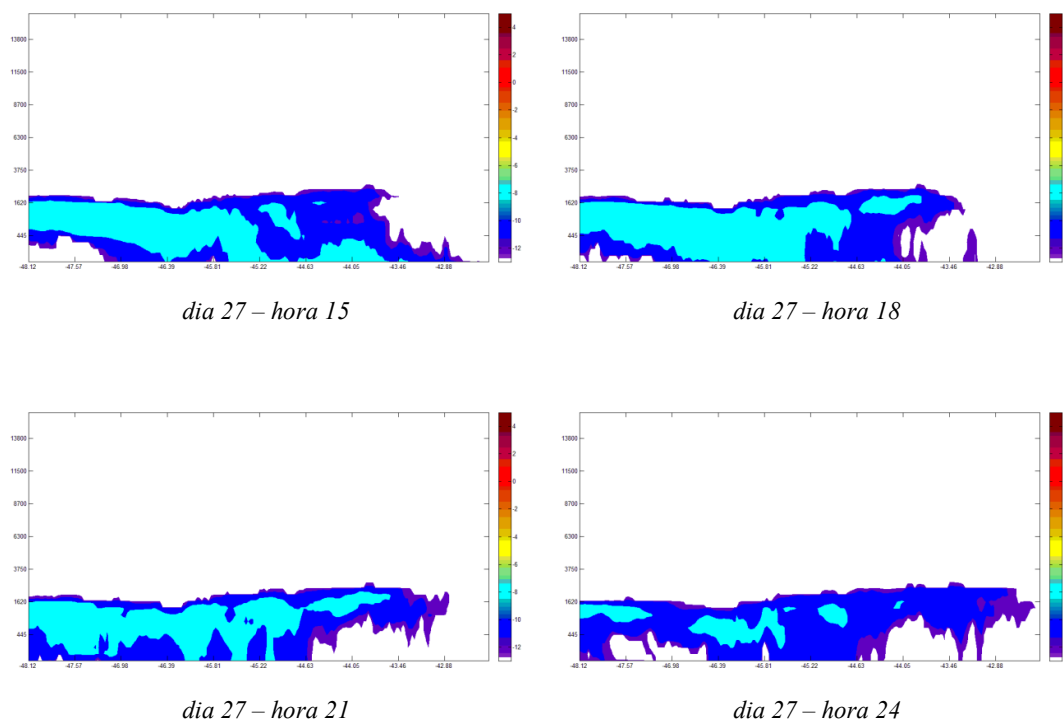


Figura 140 - Variação longitudinal média das concentrações com intervalo de 3 horas

De Oliveira (2010) destaca a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) está situada em uma região complexa sob os pontos de vista meteorológico, topográfico e geográfico. Principalmente pela interação entre os fenômenos de transporte e transformação dos poluentes e as circulações sinóticas, mesoescala e locais, como o sistema de brisas marítima e terrestre.

Para fins de dispersão de poluentes na atmosfera, as características topográficas acidentadas da Serra do Mar e da Mantiqueira com altitude superior à 2000m, formam um paredão na área da CNAAA, que tendem a amplificar a concentração no entorno da CNAAA. A proximidade com o oceano Atlântico é responsável pela regulação da temperatura (mais amenas na região) e pela grande quantidade de vapor d'água. A presença da Serra do Mar faz com que o vapor d'água não penetre no continente provando chuvas orográficas. A precipitação também está associada a passagem dos sistemas frontais que trazem chuvas constantes e ventos fortes, especialmente durante o inverno. Apesar de menos frequentes nos meses verão, os índices pluviométricos são maiores

(ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A., 2007b). A região de Angra apresenta um regime de precipitação bem definido, com uma estação chuvosa (verão) e uma estação seca (inverno), com média anual acumulada variando entre 1500 e 2000 mm sendo estas características importantes nos processos de dispersão de poluentes e limpeza da atmosfera.

Assim, para um estudo pormenorizado das trajetórias faz-se necessário relevar as características geográficas e meteorológicas locais uma vez que influem nos diversos processos que afetam a dispersão e o transporte dos poluentes na atmosfera. Bem como, aspectos envolvendo características física e químicas do poluente e da fonte emissora.

Capítulo 6 – Conclusão

A compreensão dos aspectos associados à poluição atmosférica, principalmente em decorrência do aumento das emissões de origem antropogênicas, tem sido um desafio no que tange a identificação: das fontes emissão, das propriedades e efeitos dos compostos químicos já presentes na atmosfera. Além disso, os poluentes emitidos podem se concentrar ou serem transportados para grandes distâncias, cuja trajetória é influenciada por diversos fatores, dentre eles as condições meteorológicas da região.

Assim, este estudo buscou através da determinação e análise dos regimes de tempo predominantes para uma dada região reconhecer suas influências sobre os padrões de dispersão e as respectivas trajetórias na atmosfera. Bem como o de apresentar uma ferramenta que pode ser aplicada no processo de avaliação de possíveis impactos ambientais a todas as tipologias em qualquer fase do processo regulatório de licenciamento ambiental.

Os resultados obtidos permitiram o uso das reanálises é uma forma de suprir a falta de séries históricas e proporcionando uma boa caracterização das condições meteorológicas e climáticas da região de estudo. Uma vez que a carência ou a não confiabilidade de dados históricos de parâmetros meteorológicos é uma das dificuldades apontadas para a realização dos estudos e relatórios ambientais.

Para observar os regimes de tempo, pelo método de análise por clusters/EOF deve-se relevar o tamanho da grade. Áreas muito grandes podem capturar processos de circulação não relevantes e não atuantes na região de estudo. Outro ponto a ser considerado são as características geográficas, tais como maritimidade, vegetação, topográfica, que influenciam nas condições locais de tempo e de circulação.

No que tange as emissões de poluentes atmosféricos, as análises dos dados meteorológicos permite identificar períodos críticos e locais o monitoramento dos poluentes e a modelagem matemática para simulação da qualidade do ar são as ferramentas principais para os estudos relacionados aos planos de controle da poluição do ar.

As simulações com o WRF que serviram de base para representar as trajetórias das plumas apresentaram resultados condizentes com o esperado considerando as circulações dos regimes de tempo predominantes. Sendo importante pois, fornece informações acerca

das condições meteorológicas que influenciam na dispersão, ao passo que orienta o monitoramento em casos acidentais ou de operação normal do sistema.

Os resultados obtidos com as simulações da pluma evidenciaram a importância do estudo das trajetórias para as condições de tempo predominantes para uma certa região, uma vez que foi significativa a diferença no comportamento da pluma (e na concentração) entre os dois episódios estudados.

Entretanto, para um maior nível de detalhamento da trajetória e da dispersão faz-se necessário considerar todos os processos envolvidos (tais como os de remoção de poluentes da atmosfera), química das reações dos poluentes e as características geográficas da região durante a simulação.

Dessa forma, os modelos matemáticos de dispersão de poluentes na atmosfera são uma ferramenta para o controle da poluição atmosférica em escala local e regional, além de possibilitar correlacionar a fonte emissora com os efeitos dos poluentes, suas concentrações, indicam além de indicar o foco das ações de mitigação e de monitoramento, servindo como uma ferramenta para a tomada de decisão.

Finalizando, este trabalho procurou demonstrar a importância do estudo dos sistemas meteorológicos identificando os cenários atmosféricos recorrentes e relevantes e suas influências sobre uma região, cujas informações podem ser aplicadas tanto para um simples diagnóstico quanto para simulações numéricas de transporte e dispersão de poluentes. Permitindo realizar prognósticos sobre as regiões que possam ser afetadas e os possíveis impactos sobre as populações, além de propor medidas mitigadoras e planos de monitoramento.

Bibliografia

- Abbs, D.J., Physick, W.L. (1992). *Sea breeze observations and modelling: a review*. Aust. Meteorol. Mag. 41, 7–19
- Abdul-Wahab, S. A., Chan, K., Elkamel, A., & Ahmadi, L. (2014). *Effects of meteorological conditions on the concentration and dispersion of an accidental release of H₂S in Canada*. Atmospheric Environment, 82, 316-326.
- Anderson, H. R. (2009). *Air pollution and mortality: A history*. Atmospheric Environment, 43(1), 142-152.
- Anderson, H.R. (1999). *Health effects of air pollution episodes*. In: Holgate, S.T. (Ed.), Air Pollution and Health. Academic Press, London, pp. 461–482.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (n.d.a) . *Parte III Fontes não-renováveis: Energia Nuclear*. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap8.pdf
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. (n.d.b). *Reservas, Extração e Beneficiamento de Urânio no Brasil*. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/outras_fontes/10_2_3.htm
- APA, Agência Portuguesa do Ambiente. (n.d.). *Avaliação de Impacte Ambiental*. Disponível em: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=17&subref=146>
- APAAMBIENTE. (n.d.c). *Avaliação de Impacte Ambiental*. disponível em: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=17&subref=146&sub2ref=477>
- APAI. Associação Portuguesa de Avaliação de Impactes. (n. d.). *Introdução: O que é a Avaliação de Impacte Ambiental*. Disponível em: <http://www.apai.org.pt/ml/1200595571volume1.pdf>
- Barbieri, P. R. B. (2005). *Caracterização da estação chuvosa nas regiões sul e sudeste do Brasil associado com a circulação atmosférica*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Barnett, T.P. and Preisendorfer, R.W. (1978). *Multifield analog prediction of short term climate fluctuations using a climate state vector*, J. Atmos. Sci., 35, 1771–1787.
- Barrier, N., Deshayes, J., Treguier, A. M., & Cassou, C. (2015). *Heat budget in the North Atlantic subpolar gyre: Impacts of atmospheric weather regimes on the 1995 warming event*. Progress in Oceanography, 130, 75-90.
- Bastos, C. C., & Ferreira, N. J. (2000). *Análise climatológica da alta subtropical do Atlântico Sul*. CEP, 12220, 110.
- Benamrane, Y., & Boustras, G. (2015). *Atmospheric dispersion and impact modeling systems: How are they perceived as support tools for nuclear crises management?*. Safety science, 71, 48-55..
- BIBLIOGRÁFICA, U. R. (2010). *Regimes de precipitação na América do Sul*. Revista Brasileira de Meteorologia, 25(2), 185-204.
- Bjornsson H, Venegas SA. (1997). *A Manual for EOF and SVD ~ Analyses of Climate Data*. Report N°: 97-1, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change Research, McGill University. 52
- Braga, C. C., Macedo, M. J. H., da Silva, B. B., & Braga, R. C. (2012). *Aplicação dos Componentes Principais na Simulação e Consistência de Séries Temporais*. Revista de Geografia (Recife), 29(1), 113-125.
- Cardoso, E. M. (n.d.). *Apostila Educativa: Energia Nuclear*. Disponível em <http://www.cnem.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>
- Cassou, C. (2008). *Intraseasonal interaction between the Madden-Julian oscillation and the North Atlantic Oscillation*. Nature, 455, 525–527
- Cassou, C. Deser, L. Terray, J. W. Hurrell, and M. Dre'villon (2004). *Summer sea surface temperature conditions in the North Atlantic and their impact upon the atmospheric circulation in early winter*. J. Climate, 17, 3349–3363.

- Cassou, C., Minvielle, M., Terray, L., Perigaud, C., (2011). *A statistical-dynamical scheme for reconstructing ocean forcing in the Atlantic. Part I: weather regimes as predictors for ocean surface variables*. Climate Dynamics 36 (1–2), 19–39. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-010-0781-7>.
- Cassou, C., Terray, L., Hurrell, J. W., & Deser, C. (2004). *North Atlantic winter climate regimes: Spatial asymmetry, stationarity with time, and oceanic forcing*. Journal of Climate, 17(5), 1055-1068.
- Cattiaux, J., Vautard, R., Cassou, C., Yiou, P., Masson-Delmotte, V., & Codron, F. (2010). *Winter 2010 in Europe: a cold extreme in a warming climate*. Geophysical Research Letters, 37(20).
- Charney, J. G., & DeVore, J. G. (1979). *Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking*. Journal of the atmospheric sciences, 36(7), 1205-1216.
- Cheng, X., and J. M. Wallace (1993). *Cluster analysis of the Northern Hemisphere wintertime 500-hPa height field: Spatial patterns*. J. Atmos. Sci., 50, 2674–2696
- Christensen, H. M., Moroz, I. M., & Palmer, T. N. (2014). *Simulating weather regimes: impact of stochastic and perturbed parameter schemes in a simple atmospheric model*. Climate Dynamics, 44(7-8), 2195-2214.
- Christiansen, B. (2007). *Atmospheric circulation regimes: Can cluster analysis provide the number?*. Journal of Climate, 20(10), 2229-2250.
- Ciência Hoje. (2005) A energia nuclear e seus usos na sociedade. Disponível em: http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/220/pdf_aberto/nuclear.pdf
- Corte-Real, J., Qian, B., & Xu, H. (1998). *Regional climate change in Portugal: precipitation variability associated with large-scale atmospheric circulation*. International Journal of Climatology, 18(6), 619-635.
- Corti, S., & Palmer, T. N. (1997). *Sensitivity analysis of atmospheric low-frequency variability*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 125(544), 2425-2447.
- da Costa Lima, G. F. (1985). *O debate da sustentabilidade na sociedade insustentável*. Disponível em: <http://www.cefetsp.br/edu/eso/debatesustentabilidade.html>
- Damilano, D. C. R., Jorge, M. P. P. M., & Mariani, R. L. (2006). *Estudo da influência da poluição atmosférica e das condições meteorológicas na saúde em São José dos Campos*. São Paulo.
- Dawson A, Palmer TN, Corti S. (2012). *Simulating regime structures in weather and climate prediction models*. Geophys Res Lett 39(21):?L21805
- de Araújo Ribeiro, L. A., & Coelho, M. J. (n.d.). *Dispersão atmosférica em sítios de usinas nucleares*. FORTE, MÃO AMIGA., 45.
- de Oliveira Júnior, J. F., Pimentel L. C. G., Landau L. (2010). *Critérios de estabilidade atmosférica para a região da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis – RJ*. Revista Brasileira de Meteorologia, 25(2), 270-285.
- Deshmukh, D.K., Deb, M.K., Mkoma, S.L. (2013). *Size distribution and seasonal variation of size-segregated particulate matter in the ambient air of Raipur city, India*. Air Qual. Atmos. Health 6, 259–276.
- Diário de Notícias. (2011/03/15). *Nuclear: Portugal e Espanha têm planos de emergência*. Disponível em: http://www.dn.pt/especiais/interior.aspx?content_id=1806615&especial=Sismo%20arrasa%20Jap%20E3o&secao=MUNDO
- Dinis, M. L., Fiúza, A., Góis, J., Carvalho, J. M. S., & Castro, A. C. M. (2014). *Modeling Radionuclides Dispersion and Deposition Downwind of a Coal-Fired Power Plant*. Procedia Earth and Planetary Science, 8, 59-63.
- Directiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa. (2008/05/21). Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:PT:PDF>
- Driouech, F., Déqué, M., & Sánchez-Gómez, E. (2010). *Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation*. Global and Planetary Change, 72(1), 1-10.
- EEA, European Environmental Agency. (2008). *Dispersion of air pollutants*. Disponível em: <http://www.eea.europa.eu/publications/2599XXX/page005.html>

- Egler, P. C. G. (2010). *Perspectivas de uso no Brasil do processo de Avaliação Ambiental Estratégica*. *Parcerias Estratégicas*, 6(11), 175-190.
- ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A. (2007a). *Estudo de Análise de Riscos da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – CNAAA*. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/hotsites/eia/index.html>
- ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A. (2007b). *Estudo de Impacto Ambiental da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – CNAAA*.
- ELETRONUCLEAR. (n.d.a). *Central Nuclear de Angra dos Reis*. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/AEmpresa/CentralNuclear.aspx>
- ELETRONUCLEAR. (n.d.b). *Novas usinas nucleares*. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentes/Novasusinasnucleares.aspx>
- ENS, European Nuclear Society. (n.d.). *Nuclear power plants in Europe*. Disponível em: <http://www.euronuclear.org/1-information/maps.htm>
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.a). *About Air Toxics*. Disponível em: <http://www.epa.gov/airtoxics/allabout.html#what>
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.b). *Air: Basic Information*. Disponível em: <http://www.epa.gov/air/basic.html>
- Esteves, R. J. G. A. & Masili, G. S. (n.d.). *Usina Nuclear*. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/nuclear/nuclear.htm>
- EUMETCAL. (n.d.). *Weather regimes*. Disponível em: (<http://www.eumetcal.org/euromet/english/nwp/n7300/n7300006.htm>)
- EXPRESSO. (2011/05/19). 70% dos portugueses não querem centrais nucleares. Disponível em: <http://expresso.sapo.pt/70-dos-portugueses-nao-querem-centrais-nucleares=f649665>
- Fenger, J. (2009). *Air pollution in the last 50 years—From local to global*. *Atmospheric Environment*, 43(1), 13-22.
- Figueira, R. C., & Cunha, I. I. (1998). *A contaminação dos oceanos por radionuclídeos antropogênicos*. *Química Nova*, 21(1), 73.
- Freese, B. (2003). *Coal: A Human History*. Preseus Books Group, Cambridge, MA.
- Gaffney, J. S., & Marley, N. A. (2009). *The impacts of combustion emissions on air quality and climate—from coal to biofuels and beyond*. *Atmospheric Environment*, 43(1), 25-36.
- Gangoiti, G., Alonso, M., Navazo, M., Albizuri, A., Perez-Landa, G., Matabuena, M., Valdenebro, V., Maruri, M., Garcia, J.A., Millan, M.A. (2002). *Regional 116 D.K. Papanastasiou et al. / Atmospheric Research 98 (2010) 102–117 transport of pollutants over the Bay of Biscay: analysis of an ozone episode under a blocking anticyclone in west central Europe*. *Atmos. Environ.* 36, 21349–21361.
- Ghil, M., and A. W. Robertson (2002). “Waves” vs. “particles” in the atmosphere’s phase space: A pathway to a long-range forecasting? *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 99, 2493–2500
- Ghil, M., and S. Childress (1987). *Topics in Geophysical Fluid Dynamics: Atmospheric Dynamics, Dynamo Theory and Climate Dynamics*. Springer-Verlag, 485 pp.
- Gorenz, P., Herzog, N., & Egbers, C. (2013). *Investigation of CO₂ Release Pressures in Pipeline Cracks*. *Energy Procedia*, 40, 285-293.
- Grimm, A. M., and Ferraz, S. E. T.. (1998). *Sudeste do Brasil: uma região de transição no impacto de eventos extremos da Oscilação Sul. Parte I: El Niño*. *Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Sociedade Brasileira de Meteorologia
- Hai, C. D., & Oanh, N. T. K. (2013). *Effects of local, regional meteorology and emission sources on mass and compositions of particulate matter in Hanoi*. *Atmospheric Environment*, 78, 105-112.
- Hannachi, A., Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (2007). *Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review*. *International Journal of Climatology*, 27(9), 1119-1152.

- Hertig, E., & Jacobeit, J. (2014). *Variability of weather regimes in the North Atlantic-European area: past and future*. Atmospheric Science Letters, 15(4), 314-320.
- Herzog, N., & Egbers, C. (2013). *Atmospheric Dispersion of CO₂ Released from Pipeline Leakages*. Energy Procedia, 40, 252-259.
- Hilmelman, Willian. (1993). *Air Quality Control*. Lambton College Of Applied Arts and Technology. Sarnia, Canadá.
- Huh, An Chih, Lin, Chuan Yao, Hsu, Shih Chieh (2013). *Regional dispersal of Fukushima derived fission nuclides by East Asian monsoon: a synthesis and review*. Aerosol Air Qual. Res. 13, 537–544.
- IAEA, International Atomic Energy Agency. (2012/03/09). *One Year After Fukushima, Nuclear Safety Is Stronger*. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/one-year-after-fukushima-nuclear-safety-stronger>
- ICEA. (n.d.). *Manual de instalação, compilação e execução do sistema de modelagem numérica WRF no ICEA*. Disponível em: www.icea.gov.br/climatologia/InstalacaoWRF.pdf
- INPE, CPTEC. (1986). *Boletim de Monitoramento e Análise Climática-Climanálise-Número Especial*.
- INPE, CPTEC. (2013). *Climanálise—boletim de monitoramento e análise climática*, vol. 28, nº07.
- INPE, CPTEC. (n.d.). *El Niño*. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/elnino/pt>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007) *Working Group III: Mitigation – Nuclear Power*. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=128>
- Janhäll, S., Jonsson, A.M., Molnár, A., Svensson, E.A., Hallquist, M. (2004). *Size resolved traffic emission factors of submicrometer particles*. Atmos. Environ. 38, 4331–4340.
- Jiang, F., Wang, T., Wang, T., Xie, M., & Zhao, H. (2008). *Numerical modeling of a continuous photochemical pollution episode in Hong Kong using WRF–chem*. Atmospheric Environment, 42(38), 8717-8727.
- Kageyama, M., D’andrea, F., Ramstein, G., Valdes, P. J., & Vautard, R. (1999). *Weather regimes in past climate atmospheric general circulation model simulations*. Climate dynamics, 15(10), 773-793.
- Kanungo, T., Mount, D. M., Netanyahu, N. S., Piatko, C. D., Silverman, R., & Wu, A. Y. (2002). *An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 24(7), 881-892.
- Katata, G., Ota, M., Terada, H., Chino, M., & Nagai, H. (2012). *Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident*. Journal of environmental radioactivity, 109, 103-113.
- Kawano, M. (2000). *Modelo Matemático Gaussiano de dispersão de poluentes na atmosfera*.
- Kidson, J. W. (2000). *An analysis of New Zealand synoptic types and their use in defining weather regimes*. International journal of climatology, 20(3), 299-316.
- Kjellstrom, T. Lodh M, McMichael T, et al. (2006). *Air and Water Pollution: Burden and Strategies for Control*. In: Jamison DT, Breman JG, Measham AR, et al., editors. Disease Control Priorities in Developing Countries. 2nd edition. Washington (DC): World Bank; Chapter 43
- Klemp, J.B., (2004). *Weather research and forecasting model: a technical overview*. In: The 84th AMS Annual Meeting, Seattle, pp. 10–15.
- Kondrashov, D., Ghil, M., Ide, K., & Todling, R. (2002). *Data Assimilation and Weather Regimes in a Three-Level Quasi-Geostrophic Model*.
- Koornneef, J., Ramírez, A., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2012). *The environmental impact and risk assessment of CO₂ capture, transport and storage—An evaluation of the knowledge base*. Progress in Energy and Combustion Science, 38(1), 62-86.

- Koornneef, J., Spruijt, M., Molag, M., Ramírez, A., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2010). *Quantitative risk assessment of CO₂ transport by pipelines—a review of uncertainties and their impacts*. Journal of hazardous materials, 177(1), 12-27.
- Korsakissok, I., Mathieu, A., & Didier, D. (2013). *Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A local-scale simulation and sensitivity study*. Atmospheric Environment, 70, 267-279.
- Kousky, V. E.; Kagano, M. T.; Cavalcanti, I. F. A. (1984). *The southern oscillation: oceanic atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies*. Tellus, v. 36A, n. 5, p.490-504.
- Legras, B., & Ghil, M. (1985). *Persistent anomalies, blocking and variations in atmospheric predictability*. Journal of the atmospheric sciences, 42(5), 433-471.
- Lisboa, H. M. (2007). *Controle da Poluição Atmosférica : Capítulo VIII - Meteorologia e Dispersão atmosférica*. ENS/UFSC. Disponível em: <http://www.ens.ufsc.br/grade/disciplinas/ens5255/Dispers%E3o%20atmosf%E9rica1.pdf>
- Liu, X., Godbole, A., Lu, C., Michal, G., & Venton, P. (2014). *Source strength and dispersion of CO₂ releases from high-pressure pipelines: CFD model using real gas equation of state*. Applied Energy, 126, 56-68.
- Lorenz (2006) - Lorenz, E. N. (2006). *Regimes in simple systems*. Journal of the atmospheric sciences, 63(8), 2056-2073.
- Lorenz, E. N., & Krishnamurthy, V. (1987). *On the nonexistence of a slow manifold*. Journal of the Atmospheric Sciences, 44(20), 2940-2950.
- Lorenz, E. N., (1956). *Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction*. Sci. Rep. No. 1, Statistical Forecasting Project, M.I.T., Cambridge, MA, 48 pp.
- Lozano, R.L., Hernández-Ceballos, M.A., Adame, J.A., Casas-Ruiz, M., Sorribas, M., San Miguel, E.G., Bolívar, J.P. (2011). *Radioactive Impact of Fukushima Accident on the Iberian Peninsula: Evolution and Plume Previous Pathway*. Environment International. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2011.06.001>
- Manolopoulou, M., Vagena, E., Stoulos, S., Ioannidou, A., Papastefanou, C.(2011). *Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, Northern Greece due to the Fukushima nuclear accident*. Journal of Environmental Radioactivity 102, 796e797.
- MathWorks. (2015a). *Introduction to cluster analysis*. Disponível em: <http://www.mathworks.com/help/stats/introduction-to-cluster-analysis.html>
- MathWorks. (2015b). *K-means clustering: Introduction to k-Means Clustering*. Disponível em: http://www.mathworks.com/help/stats/k-means-clustering.html#bq_679x-19
- Mendonça, F.; Danni-Oliveira, I. M. (2007). *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Texto. Sociedade & Natureza, vol. 22, núm. 3, diciembre, 2010, pp. 639-640 Universidade Federal de Uberlândia Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
- Met Office. (2015/04/20). *The Great Smog of 1952*. Disponível em: <http://www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/weather-phenomena/case-studies/great-smog>
- Michelangeli, P. A., Vautard, R., & Legras, B. (1995). *Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity*. Journal of the Atmospheric Sciences, 52(8), 1257-1256.
- Miyakoda, K., Gordon, T., Caverly, R., Stern, W., Sirutis, J., & Bourke, W. (1983). *Simulation of a blocking event in January 1977*. Monthly Weather Review, 111(4), 846-869.
- MMA, Ministério do Meio Ambiente. (n.d.a). *Agenda 21 Global*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>.
- MMA, Ministério do Meio Ambiente. (n.d.b). *Convenção da Diversidade Biológica*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biodiversidade/convencao-da-diversidade-biologica>
- MMA, Ministério do Meio Ambiente. (n.d.c). *Energia Nuclear*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/fontes-convencionais-de-energia/energia-nuclear?tmpl=component&print=1>

- Mo, K., and M. Ghil (1988). *Cluster analysis of multiple planetary flow regimes*. J. Geophys. Res., 93, 10 927–10 952.
- Molnary, L. (2014). *Modelo de camada limite planetaria para estimar a concentração de radionuclídeos em liberações acidentais*. Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento.
- Molteni, F., Kucharski, F., and Corti, S. (2006). *On the predictability of flow- regime properties on interannual to interdecadal time scales, in Predictability of Weather and Climate*, eds T. Palmer and R. Hagedorn (Cambridge: Cambridge University Press), 365–390
- Molteni, F., Tibaldi, S. and Palmer, T.N. (1990). *Regimes in the wintertime circulation over northern extratropics. I: observational evidence*, Q.J.R. Meteorol. Soc., 116, 31–67.
- Momoshima, N., Sugihara, S., Ichikawa, R., & Yokoyama, H. (2012). *Atmospheric radionuclides transported to Fukuoka, Japan remote from the Fukushima Dai-ichi nuclear power complex following the nuclear accident*. Journal of environmental radioactivity, 111, 28-32.
- Monahan A.H. (2001). *Nonlinear principal component analysis: tropical indo-pacific sea surface temperature and sea level pressure*. Journal of Climate 14: 219–253.
- Moreira, D., & Tirabassi, T. (2004). *Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental*. Ambiente & sociedade, 7(2), 159-172.
- Moron V, Plaut G. (2003). *The impact of El Nino southern oscillation ~ upon weather regimes over Europe and the North Atlantic during boreal winter*. International Journal of Climatology 25: 363–379.
- Moron, V., Robertson, A. W., Ward, M. N., & Ndiaye, O. (2008). *Weather types and rainfall over Senegal. Part I: Observational analysis*. Journal of Climate, 21(2), 266-287.
- NEA.Nuclear Energy Agency. (2014/09/05). *Fukushima Press Kit*. Disponível em: <http://www.oecd-neo.org/press/press-kits/fukushima.html>
- Nimer, E. (1979). *Climatologia do Brasil*. Superintendência de recursos naturais meio ambiente, IBGE/SUPREM. Rio de Janeiro. 422p.
- NISA, Nuclear and Industrial Safety Agency. (2011a). *Regarding the Evaluation of the Conditions on Reactor Cores of Unit 1, 2 and 3 Related to the(Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*. Tokyo Electric Power. Disponível em: <http://www.nisa.meti.go.jp/english/press/2011/06/en20110615-5.pdf>.
- NISA, Nuclear and Industrial Safety Agency. (2011b). *Regarding the Discharge of the Waste Water, of Which the Concentration of Radioactive Materials Exceeds the Concentration Limit by the Notification, to the Sea*. Disponível em: <http://www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110416-10.pdf>.
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (n.d.). *State of the Climate*. Disponível em: <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/>
- North, G. R., Pyle, J. A., & Zhang, F. (Eds.). (2014). *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Vol. 1)*. Elsevier.
- Nunes, F. (2014/09/12). EXAME.COM. *Governo projeta quatro novas usinas nucleares no Brasil*. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/brasil/noticias/governo-projeta-quatro-novas-usinas-nucleares-no-brasil>
- Oke, T.R. (1978). *Boundary Layer Climates*. Methuen
- Oliveira, A. (1986). *Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia*. (INPE-4008-TDL/259). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.
- Papanastasiou, D. K., Melas, D., & Lissaridis, I. (2010). *Study of wind field under sea breeze conditions; an application of WRF model*. Atmospheric Research, 98(1), 102-117.
- Paz, S. R., Alves, R. C. M., Teixeira, E. C., & Dallarosa, J. B. (2007). *Utilização de Modelagem Numérica para o estudo da dispersão de poluentes emitidos pela Usina Termoeletrica Presidente Médici*. Química Nova, 30(7), 1609.
- Peixóto, J. P., and A. H. Oort (1992). *Physics of Climate*. Amer. Inst. Physics, New York, 520 pp.

- Pivello, V. R. (2007). *Breve histórico da evolução do pensamento conservacionista no Brasil*. CEP, 5508, 900.
- Plaut G, Simonnet E. (2002). *Large-scale circulation classification, weather regimes and local climate over France, the Alps and Western Europe*. Climate Research 17: 303–324.
- Pohl, B., & Fauchereau, N. (2012). *The southern annular mode seen through weather regimes*. Journal of Climate, 25(9), 3336-3354.
- Polo, I., Ullmann, A., Roucou, P., & Fontaine, B. (2011). *Weather regimes in the Euro-Atlantic and Mediterranean sector, and relationship with West African rainfall over the 1989-2008 period from a self-organizing maps approach*. Journal of Climate, 24(13), 3425-3432.
- Portal Brasil. (2011/12/14). *Infraestrutura: Brasil tem usinas nucleares e reservas de matéria-prima*. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/brasil-tem-usinas-nucleares-e-reservas-de-materia-prima>
- Price, H. D., Arthur, R., Bérubé, K. A., & Jones, T. P. (2014). *Linking particle number concentration (PNC), meteorology and traffic variables in a UK street canyon*. Atmospheric Research, 147, 133-144.
- Ramanathan, V., & Feng, Y. (2009). *Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives*. Atmospheric Environment, 43(1), 37-50.
- RECYF, Recherche et Expérimentations sur les Cyclogénèses et les Fronts. (n.d.). *Weather regimes*. Disponível em: <http://www.cnmr.meteo.fr/recyf/spip.php?rubrique46&lang=en>
- Resolução CONAMA Nº 03/1990. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>
- RIU, Rhenish (2011). Institute for Environmental Research at the University of Cologne, http://www.eurad.uni-koeln.de/index_e.html.
- Robertson, A. W., & Ghil, M. (1999). *Large-scale weather regimes and local climate over the western United States*. Journal of Climate, 12(6), 1796-1813.
- Robertson, A. W., C. Mechoso, and Y. Kim (2000). *The influence of Atlantic sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation*. J. Climate, 13, 122–138
- Ruiz, J.J., Saulo, C., Nogues-Paegle, J. (2010). *WRF model sensitivity to choice of parameterization over South America: validation against surface variables*. Mon. Weather Rev. 138 (8), 3342–3355.
- Sáenz, F., & Durán-Quesada, A. M. (2015). *A climatology of low level wind regimes over Central America using a weather type classification approach*. Frontiers in Earth Science, 3, 15.
- Sanchez-Gomez, E., C. Cassou, D. L. R. Hodson, N. Keenlyside, Y. Okumura, and T. Zhou, (2008). *North Atlantic weather regimes response to Indian-western Pacific Ocean warming: A multi-model study*. Geophys. Res. Lett., 35, L15706, doi:10.1029/2008GL034345
- Santos, J. A., Corte-Real, J., & Leite, S. M. (2005). *Weather regimes and their connection to the winter rainfall in Portugal*. International Journal of Climatology, 25(1), 33-50.
- Satyamurty, P.; Mattos, L. F. (1989). *Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence*. Monthly Weather Review, v. 117, n. 6, p. 1355-1364.
- Satyamurty, P.; Nobre, C.; Dias, P. S. (1998). *South América: tropics meteorology of the southern hemisphere*. American Meteorological Society, v. 27, n. 49, p. 119-139.
- Secretaria do Meio Ambiente – Coordenadoria de Educação Ambiental. (1993). *Conferência intergovernamental sobre educação ambiental I- Tbilisi, Geórgia, ex-URSS, de 14 a 26 de outubro de 1977*. Publicação Meio Ambiente e Desenvolvimento: Documentos Oficiais. São Paulo. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/cea/Tbilisicompleto.pdf>
- Shrivastava, R., Dash, S. K., Oza, R. B., & Hegde, M. N. (2015). *Evaluation of parameterization schemes in the Weather Research and Forecasting (WRF) model: A case study for the Kaiga nuclear power plant site*. Annals of Nuclear Energy, 75, 693-702.
- Simpson, J.E. (1994). *Sea Breeze and Local Wind*. Cambridge University Press.

- Smith, J. N.; Bowers, J. M. (1993). *Canadian Chem. News*, october, 25.
- Smyth, K. Ide, and M. Ghil (1999). *Multiple regimes in Northern Hemisphere height fields via mixture model clustering*. J. Atmos. Sci., 56, 3704–3725.
- Srinivas, C. V., Venkatesan, R., Baskaran, R., Rajagopal, V., & Venkatraman, B. (2012). *Regional scale atmospheric dispersion simulation of accidental releases of radionuclides from Fukushima Dai-ichi reactor*. Atmospheric Environment, 61, 66-84.
- Stephenson, D. B., Hannachi, A., & O'Neill, A. (2004). *On the existence of multiple climate regimes*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 130(597), 583-606.
- Stoelinga, Mark T. *An update on port-processing and visualization tools for the WRF model*. (n. d.). University of Washington, Seattle, WA
- Straus DM, Corti S, Molteni F. (2007). *Circulation regimes: chaotic variability versus sst-forced predictability*. J Clim 20(10):2251–2272
- Straus, D. M. (2010). *Synoptic-eddy feedbacks and circulation regime analysis*. Monthly Weather Review, 138(11), 4026-4034.
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht: Kluwer.
- Takemura, T., Nakamura, H., Takigawa, M., Kondo, H., Satomura, T., Miyasaka, T., Nakajima, T. (2011). *A Numerical simulation of global transport of atmospheric particles Emitted from the Fukushima*.
- Teknomo, K. (n.d.) K-Means Clustering Tutorial. Disponível em: <http://croce.ggf.br/dados/K%20mean%20Clustering1.pdf>
- Terray, L., Demory, M. E., Déqué, M., de Coetlogon, G., & Maisonnave, E. (2004). *Simulation of late-twenty-first-century changes in wintertime atmospheric circulation over Europe due to anthropogenic causes*. Journal of Climate, 17(24), 4630-4635.
- Tibaldi, S., & Molteni, F. (1990). *On the operational predictability of blocking*. Tellus A, 42(3), 343-365.
- Turner, B.D. (1994). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling*. 2 ed, Lewis Publishers.
- U.S. NRC, United States Nuclear Regulatory Commission. (2014). *Background on Chernobyl Nuclear Power Plant Accident*. Disponível em: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/chernobyl-bg.html>
- Ullmann, A., & Moron, V. (2008). *Weather regimes and sea surge variations over the Gulf of Lions (French Mediterranean coast) during the 20th century*. International Journal of Climatology, 28(2), 159.
- UNICAMP, Biblioteca Didática de Tecnologias Ambientais. (n.d.). *Histórico dos movimentos ambientais no Brasil e no mundo*. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~bdta/premissas/historico.htm>
- UNSCEAR. (2008). *Sources and effects of ionizing radiation (annex D)*. New York: United Nations;
- UNSCEAR. (2012). *The Chernobyl accident*. Disponível em: <http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>
- USP. (n.d.a). *Ciclones e ciclogêneses*. Disponível em: <http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula10/>
- USP. (n.d.b). *Climatologia Dinâmica do Brasil e principais sistemas meteorológicos*. Disponível em: <http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula04/>
- Varghese, S., Langmann, B., Ceburnis, D., & O'Dowd, C. D. (2011). *Effect of horizontal resolution on meteorology and air-quality prediction with a regional scale model*. Atmospheric Research, 101(3), 574-594.
- Vautard, R. (1990). *Multiple weather regimes over the North Atlantic: Analysis of precursors and successors*. Monthly weather review, 118(10), 2056-2081.
- Vautard, R. et al. (1992). *Singular spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals*, Physica D, 58, 95–126.

- Vautard, R., and B. Legras. (1988). *On the source of low frequency variability. Part II: Nonlinear equilibration of weather regimes*. J. Atmos. Sci., 45, 2845-2867.
- Vianello, R.L.; Alves, A.R.(1991). *Meteorologia básica e Aplicações*. Viçosa – MG. Imprensa Universitária.
- Vrac, M., & Yiou, P. (2010). *Weather regimes designed for local precipitation modeling: Application to the Mediterranean basin*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 115(D12).
- Wallace, John M, and Peter V. Hobbs (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- Walter, A. (2007). *As Mudanças Climáticas e a Questão Energética*. Revista Multiciência. Campinas. Edição, (8), 29-47.
- Wark, Kenneth; Warner, Cecil F.; e Davis, Wayne T. (n.d.). *Air Pollution: its origin and control*. Edit. Addison-Wesley, Terceira Edição. Capítulo IV Dispersion of pollutants in the atmosphere.
- Winiarek, V., Vira, J., Bocquet, M., Sofiev, M., & Saunier, O. (2011). Towards the operational estimation of a radiological plume using data assimilation after a radiological accidental atmospheric release. Atmospheric Environment, 45(17), 2944-2955.
- Woolley, R. M., Fairweather, M., Wareing, C. J., Proust, C., Hebrard, J., Jamois, D., ... & Diamantonis, N. I. (2014). *An integrated, multi-scale modelling approach for the simulation of multiphase dispersion from accidental CO₂ pipeline releases in realistic terrain*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 27, 221-258.
- World Nuclear Association. (2015a). *Nuclear Power in the World Today*. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Nuclear-Power-in-the-World-Today/>
- World Nuclear Association. (2015b). *Fukushima Accident*. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Safety-of-Plants/Fukushima-Accident/>
- World Nuclear Association. (2015c). *Nuclear Power in Japan*. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Japan/>
- World Nuclear Association. (2015d). *Nuclear Power in the European Union*. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Others/European-Union>
- World Nuclear Association. (2015e). *Chernobyl Accident 1986*. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Safety-of-Plants/Chernobyl-Accident/>
- Yadav, R., Beig, G., & Jaaffrey, S. N. A. (2014). *The linkages of anthropogenic emissions and meteorology in the rapid increase of particulate matter at a foothill city in the Arawali range of India*. Atmospheric Environment, 85, 147-151.
- Yiou, P., Goubanova, K., Li, Z. X., & Nogaj, M. (2008). *Weather regime dependence of extreme value statistics for summer temperature and precipitation*. Nonlinear Processes in Geophysics, 15(3), 365-378..